理解科学丛书·赵峥科普著作

INVISIBLE
STAR

The Black Hole
and the River of Time

看不见的星

黑洞与时间之河

赵峥◎著

当爱因斯坦讲“上帝不掷骰子”时，他错了。对黑洞的思索向人们提示，上帝不仅掷骰子，而且有时还把骰子掷到人们看不到的地方去了，那地方就是黑洞。

霍金
S. W. HAWKING

时间是什么，人不问我，我很清楚；一旦问起，我便茫然。

圣·奥古斯丁
ST. AUGUSTINUS
公元4世纪

清華大學出版社





看不见的星
黑洞与时间之河

赵峥◎著

清華大学出版社
北京

图书在版编目（**CIP**）数据

看不见的星：黑洞与时间之河／赵峥著．—北京：清华大学出版社，2014

（理解科学丛书）

ISBN 978-7-302-38589-9

Ⅰ．①看…　Ⅱ．①赵…　Ⅲ．①黑洞－研究　Ⅳ．①P145.8

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第273649号

责任编辑：邹开颜

封面设计：蔡小波

责任校对：赵丽敏

责任印制：刘海龙

出版发行：清华大学出版社

网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com

地　　址：北京清华大学学研大厦A座

邮　　编：100084

社 总 机：010-62770175

邮　　购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市少明印务有限公司

经　　销：全国新华书店

开　　本：165mm×240mm

印　　张：13.25

字　　数：201千字

版　　次：2014年12月第1版

印　　次：2014年12月第1次印刷

产品编号：055376-01



引言

我第一次接触到黑洞这个概念，是在1958年前后。当时我在北京一中上初中，这所古老的中学有一个历史悠久的图书馆。我的同班好友裴申是一位天文爱好者，他从学校图书馆借到一本叫做《每月之星》的科普读物，听他谈论后我觉得非常有趣，于是也去图书馆借了一本。

这本书把中国古代的星座与希腊的星座对照介绍，不仅有美丽的神话，而且有当时最先进的科学知识。书中介绍了白矮星，那里有令人咋舌的地球人无法想象的高密度物质，体积像小酒杯大小的一块就重达1吨左右。书中还介绍了尚未发现的中子星，而且谈到爱因斯坦的广义相对论预言存在一种“看不见的星”。由于引力太大，这种星的光跑不出来，我们看不见。这种“看不见的星”就是今天所说的黑洞。这是我第一次在书中看到有关黑洞的知识。我是一个喜欢读科普书的人，但此后十多年，再也没有从其他科普书和科普文章中看到有关黑洞的介绍。

《每月之星》是我读过的最好的科普书，作者叫陶宏。书中序言的最后写道：“一九四九年一月二十二日，北平停战之日，陶宏写于北大红楼。”

1978年我到北师大天文系读研究生时，在一次谈话中提到《每月之星》这本书和作者陶宏，我的导师之一、时任天文系主任的冯克嘉先生告诉我，陶宏是陶行知先生的儿子。

1996年，我在北师大研究生院工作，有幸与顾明远教授同在一个办公室。中午休息时，我去翻看顾先生书架上的《陶行知文集》。在书中发现许多与《每月之星》相近的内容。

于是我又去翻看《每月之星》这本书的复印件，这才注意到一些我少年时代未曾注意的内容。陶宏在序言中说，这本书采用的是他在给父亲做“小助教”时用过的资料。陶行知先生过世后，他觉得有必要把父亲积累的素材编写成书，并终于编纂出版了《每月之星》这本科普读物。

我当时感到十分震惊，原以为陶行知先生只是一个文科知识和社会知识丰富的教育家，没想到他除去“中晓人和”之外，居然还“上知天文，下知地理”。我看到了一位真正伟大的教育家的形象，他为当代的教育工作者树立了光辉的榜样。细想起来，孔夫子不也是一位百科全书式的人物吗？

我上大学期间，虽然在大三结束的暑假（1965年）自学过广义相对论，但所看的那三本书中均未谈到黑洞。我再次注意到黑洞是在大学毕业之后，分配到哈尔滨东北石油化学所工作期间。1974年的一天，我在所资料室中翻阅杂志，注意到当时的《科学通报》上有王允然先生写的一篇介绍黑洞的高级科普文章，我看得津津有味。

我在中国科技大学上学期间，王先生是物理系的老师，但未教过我，不认识他，只是听说过他的名字。他和科大的一些老师和同学，通过自学攻读钻进了广义相对论的研究领域，并在宇宙学和黑洞领域开展了研究。他们组的成员有的是我上学时的年轻老师，有的是我的同学，这些熟识的名字给我巨大的鼓舞，也进一步加深了我对广义相对论和黑洞的兴趣。

真正开始钻研黑洞，是在我进入北京师范大学，做了刘辽先生的研究生之后。刘辽先生是一位正直的知识分子。抗战期间，他曾就读过空军幼年学校，准备为保卫祖国而战。抗战结束后，他又参加过共产党的外围组织，散发过《挺进报》。解放后，青年刘辽从北大毕业，打算走

科学报国的道路，但却不幸被打成右派。在那些艰难的岁月里，他没有选择放弃，而是一心苦钻理论物理，让自己的思想在爱因斯坦与相对论的天空中翱翔。

当改革开放的春天降临之际，已经掌握了相对论基本理论的刘辽，终于获得了施展抱负的机会，他开始在北师大建立研究相对论的基地，并在国内各地到处宣讲、传播爱因斯坦的理论。我有幸在这个时候考取了刘先生的研究生，在他的带领下逐渐深入到广义相对论和黑洞研究的前沿，从一个黑洞的旁观者，变成了黑洞的探索者。

当我于三十多年前初次跨入黑洞领域的时候，只有少数研究广义相对论的人对黑洞感兴趣，在那里仔细计算、反复推敲、热烈争论。天文学家一般都对此漠然视之，对宇宙中是否存在黑洞不置可否。

三十多年后的今天，情况倒过来了。天文学家大都对黑洞的存在感到乐观，认为宇宙中存在着黑洞，而且不少人认为可能存在大量的黑洞，不断有人发表论文，说这里有黑洞，那里是黑洞，似乎宇宙中处处都有黑洞。

与此相反，原来研究黑洞的理论物理学家，却有许多人感到情况不太妙，在那里争论、反思。包括霍金在内的一些专家认为，原先可能把黑洞想象得太理想化了，真实的黑洞即使存在，也与理论计算出的可能有很大的差别，甚至也可能根本就不存在黑洞。

天文学家对黑洞的乐观看法，产生自天文观测。我们知道，根据计算，一颗太阳质量的恒星，半径70万千米，密度约为每立方厘米1.4克，形成白矮星后，半径缩到1万千米，密度达到每立方厘米1吨左右。如果形成中子星，其半径将缩到10千米，密度达到每立方厘米1亿～10

亿吨。如果形成黑洞，其半径将只有3千米，“平均密度”达每立方厘米100亿吨。

现在，白矮星早已在天文观测中大量发现，约占恒星总数的十分之一。原来认为不可思议的中子星也已发现很多。而从天文学角度来看，黑洞与中子星的半径和密度其实相差不大。因此，黑洞的存在似乎是顺理成章的事了。

另外，类星体巨大能量的来源，星系中心看不见的超大质量，以及引力透镜等，这些观测结论都能用黑洞给出较为合理的解释。

而物理学家对黑洞的反思则来源于黑洞理论造成的信息疑难、奇点疑难等带有根本性的理论困难，以及以往对黑洞的过于理想化的认识。

黑洞究竟是一种什么样的天体，它到底存在不存在？本书将从天文学、物理学和数学的不同角度，来阐释黑洞的来龙去脉，它的几何结构和物理结构，它可能有哪些有趣的效应。本书还将介绍，对黑洞的研究，给物理学带来了哪些收获和重要启示。

黑洞这种从广义相对论和微分几何推演出来的天体，在没有引入任何统计假设的条件下，居然自动导出了温度和熵。也就是说，当时空弯曲到一定程度的时候，物体将自然出现热效应。这种不可思议的结果显示，万有引力与热之间，存在着目前尚不清楚的深刻的本质联系。

对黑洞和弯曲时空的深入思考，进一步把我们的注意力引向了“时间之河”。于是，我们在广义相对论和黑洞理论的基础上，深入探讨了热力学定律与时间性质之间的关系。

我们的“大胆猜测”和“小心求证”也许会勾起不少读者的兴趣，给他

们带来愉悦的思考，并把他们引向持续千年的难题：时间究竟是什么？

作者在写作本书的过程中，谨记一个原则：一本好书，不只要让人相信其内容，更重要的是让人有兴趣去进一步思考、探索和发现。

具有高中以上学历的读者不仅可以从本书中学到许多关于广义相对论、黑洞和时间本性的有趣知识，而且能够在不知不觉中提高自己的怀疑能力、创新能力和探究能力。

本书是在清华大学出版社和邹开颜编辑的大力协助下完成的，还得到石磊、朱红莲等编辑的支持；北京师范大学物理系研究生祁景钊、梁桂荣协助打印了书稿，作者在此深表感谢。

作者的科研、教学和写作工作，长期得到国家自然科学基金（如10373003，10773002等）和教育部“精品视频公开课”经费，以及北京师范大学教学经费的支持，在此一并表示深切谢意。

赵　峥

2014年夏于北京

目　录

第一章　初窥黑洞

加尔各答黑洞

我们上来先讲一段题外话。

地球上曾有一个叫黑洞的地方，在印度的加尔各答。那里有一座城堡，印度作为英国的殖民地时，它曾是英军的据点。城堡中有一间不到24平方米的牢房，只有两个小窗，英军用它来关押喝醉酒的士兵，通常可以关三四个人。他们称这间牢房为“黑洞”。

有一次印度爆发了反抗殖民者的民族起义，起义军围攻这座城堡，展开了一场血战，尸横遍野。4天后，战斗结束，愤怒的胜利者把146个俘虏使劲都塞进了这个“黑洞”，关押了10个小时。当时正值最炎热的6月，第二天早晨打开“黑洞”的门时，其中123人已经死去，只剩下23个人还活着。

20世纪90年代在加尔各答开了一次天体物理研讨会，中国科技大学的卢炬甫教授向主办者提出能否参观一下这个“黑洞”。主办方表示抱歉，说这座城堡已经拆掉了。卢教授很惊讶，说怎么会拆掉，如果在我们中国，一定会保存下来作为爱国主义的教育基地。印度朋友说：“哦，你搞错了，当时不是英国人把印度人关到里面，而是印度人把英国俘虏塞到了里面。”

拉普拉斯与米歇尔的“暗星”

今天我们所说的黑洞是相对论预言的天体，然而在19世纪末，欧洲的两位学者就曾依据牛顿力学预言过黑洞的存在。不过他们当时没有称其为黑洞，只是讨论过这种质量巨大、发光可能很强，但远方观测者又看不见的暗星。

其中一位学者拉普拉斯（1799年）曾在他的巨著《天体力学》和科普书《宇宙体系论》中谈到过这种暗星，他在书中写道：

> “天空中存在着黑暗的天体，像恒星那样大，或许像恒星那样多。一个具有与地球同样密度，而直径为太阳250倍的明亮星体，它发射的光将被它自身的引力拉住，而不能被我们接收。正是由于这个道理，宇宙中最明亮的天体很可能却是看不见的。”

然而最早预言这种暗星的还不是拉普拉斯，而是英国剑桥大学的学监米歇尔。他在1784年的一篇论文中谈到，由于恒星发射的光在万有引力作用下光速会越来越慢，如果恒星足够大，大到一定程度，就会使自身发射的光被自身的引力拉回来，于是远方的人就看不见这颗星了。

现在我们先回顾一下牛顿和他的物理理论，然后再来介绍拉普拉斯和米歇尔关于暗星的预言是如何从牛顿理论得出，又如何被否定的。

苹果落地的故事

大家都知道牛顿与苹果落地的故事。这个故事说，牛顿20多岁在乡下庄园里生活的时候，有一次坐在苹果树下思考问题，这时突然有一个苹果从树上落下来，使牛顿一下子想出了万有引力定律（图1-1）。

这个故事非常有趣，只可惜其真实性很值得怀疑。牛顿生前从来没

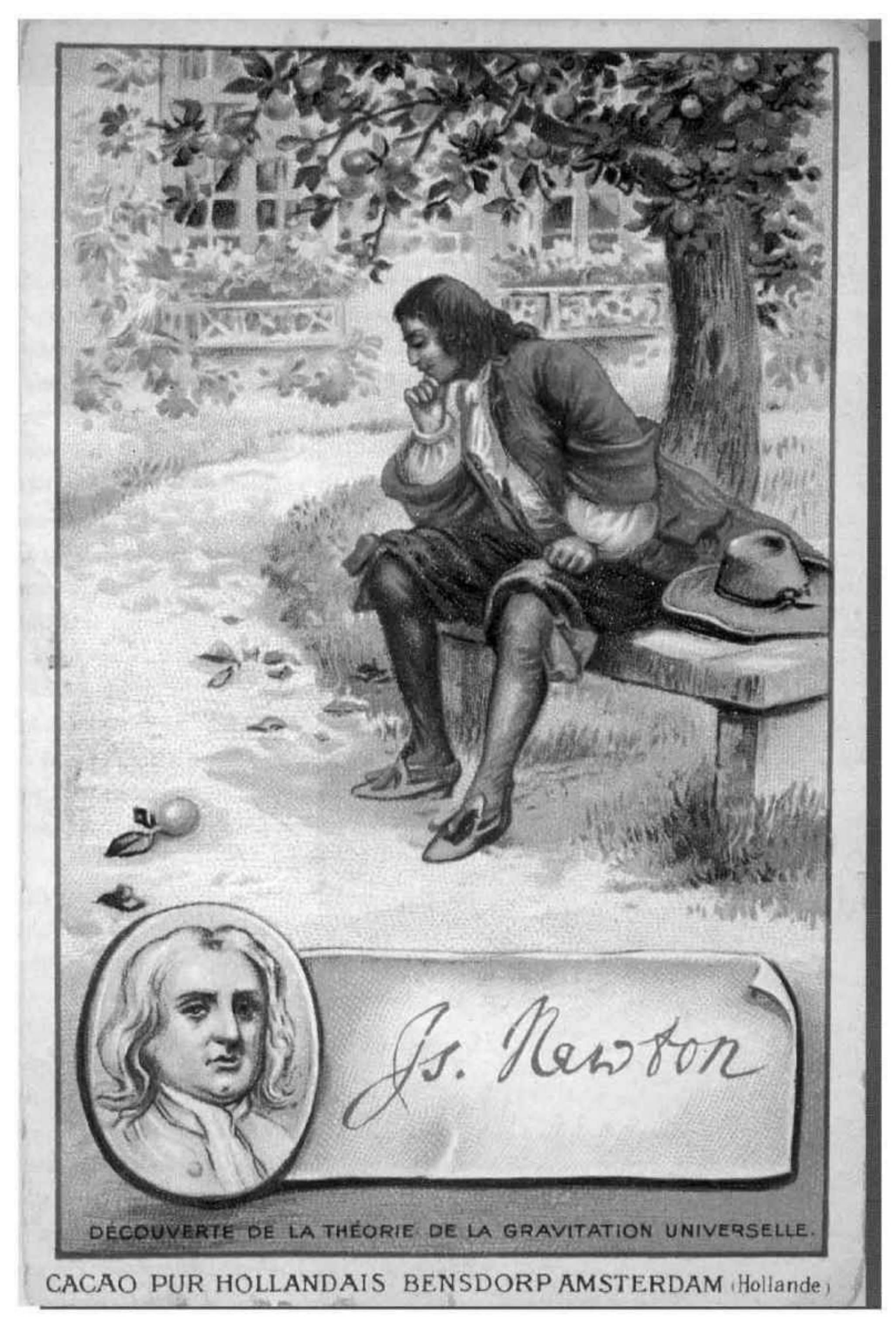


图1-1　苹果落地的故事

这个故事非常有趣，只可惜其真实性很值得怀疑。牛顿生前从来没

有人听到过这个故事，牛顿一死这个故事就冒出来了。而把这个故事传播到全世界的是法国大文豪伏尔泰。

牛顿去世时，恰好伏尔泰被法国当局驱逐出境，流亡在英国。他看到有好几万人给牛顿送葬，深受感动，觉得这个人实在太伟大了，于是去拜访了牛顿的亲属。

牛顿一辈子没有结婚，先是他的妹妹照顾他的生活，妹妹去世后就由他的外甥女照顾他的生活。伏尔泰拜访的就是牛顿的外甥女婿，这位绅士给伏尔泰讲述了苹果落地的故事。才华横溢的伏尔泰把这个故事加以润色演绎写进自己的文章，使它传遍全球。

然而，在此之前外界从未有人听说过这个故事。伏尔泰把它传播开后，有人对其真实性感到怀疑，这时又有几个在牛顿身边生活过的人出来说，他们也听牛顿讲过这个故事。

这么重要的一个使牛顿产生伟大灵感的故事，牛顿在世时居然没有和一位学者谈到过。何况中年以后的牛顿并不是一个谦虚的人，他后半生一直在跟别人争夺各项科研成就的发现权，其中很重要的一部分就是和胡克争夺万有引力定律的发现权。牛顿与外人进行了如此多的争吵，怎么一次也没有在争吵中提及这一故事呢？所以，许多人认为，这个故事很可能是牛顿的亲属为了确保他对万有引力定律的发现权而编出来的。

牛顿关于万有引力定律的论述最早出现在他的巨著《自然哲学之数学原理》中，此书是在他45岁时出版的。而苹果落地的故事发生在牛顿23～25岁之间，在乡下庄园里躲避鼠疫的时候。这个故事的出现，把牛顿发现万有引力定律的时间整整提前了20年，那是胡克等人所望尘莫及

的。

童年的牛顿

牛顿的童年是不幸的，他是一个遗腹子，还没有出世，父亲就去世了。他的父亲是一个农民，文盲，而且脾气暴躁，不过据说智力还可以，家里也不算太穷。牛顿的父系家族基本没有文化，母系家族有点文化，但也不高。

后来母亲改嫁给一位60多岁的牧师。牛顿的继父有文化，也有些钱财。但这位“思想道德工作者”本人的道德水平并不高，他不能善待前夫的儿子。

牛顿小时候饱受歧视，与同父异母的弟弟关系很差，只与妹妹关系较好。幼年的牛顿由外祖父母抚养，很少得到母爱。这样的生活状况对牛顿性格的形成造成了极大的影响，致使晚年的牛顿显得尖刻而贪婪。

在这样的家庭条件下，童年的牛顿身体很差，学习也很差，和同学相比他什么都不行，对自己也缺乏信心。此时一个突发事件改变了牛顿的人生。

他们班上有一个小霸王，欺负牛顿，踢了他的肚子一脚，疼得牛顿忍无可忍。愤怒之下，小牛顿不顾自己身单力薄，憋足了全身力气，把那个小家伙揍了一顿。没想到居然打赢了，小牛顿马上信心大增，觉得自己还行啊。他想，既然打架能赢，说不定学习也行。打架产生的自信没有把牛顿引向邪路，反而使他走上了刻苦学习的正轨。于是他的功课大有起色，而且越来越好。

不幸的是，牛顿10岁时，继父又去世了，家中缺少劳动力。上中学时，母亲把他召回家，让他干农活。但他农活儿干不好，也不大上心，

他放的羊把别人家的庄稼吃了不少。还是牛顿的舅舅有远见，觉得自己的外甥别看干农活儿不行，也许在学习上是块好料。于是说服姐姐让牛顿继续读书。

中学毕业时，牛顿的舅舅又积极活动，使他得以进入剑桥大学学习，并为他从学校争取了补助金。其实此时牛顿的母亲已从前夫那里继承了遗产，并不贫困，但她不愿为儿子掏学费。牛顿能拿到补助金，正合他母亲的心意。

然而，舅舅为牛顿争取到的这点补助金不是白给的，穷学生们必须为富有的同学打扫宿舍，买东西，甚至倒尿壶。这样的大学生涯，对于牛顿后来的性格形成肯定也有负面影响。好在牛顿的求知欲望强烈，而且确实才华出众，他终于以优异的成绩在剑桥毕业，并有幸留校当了教师。

牛顿的丰收年

刚刚留校，英国就闹鼠疫，牛顿不得不到乡下母亲的庄园中去躲避。他23～25岁之间，在那里度过了一年半岁月。不过他没有虚度光阴，这时的牛顿已步入了科研的正轨，他在那里思考、研究了许多问题。据后来他自己说，他的力学三定律、万有引力定律、光的微粒说、色散理论、微积分，都是在那段时间中研究出来的。不过，他没有提到苹果落地的故事。这个故事如果有，就应该发生在这段时间。

牛顿在庄园中度过的这一年半时间，后来被称为牛顿的“丰收年”。

青年牛顿是幸运的，他留校后碰到了伯乐式的导师巴罗。实际上，牛顿的很多哲学和物理思想来源于巴罗。在巴罗的著作中我们可以看到他对绝对空间、绝对时间以及物体运动等许多重要概念的论述。在牛顿的巨著《自然哲学之数学原理》中不难看到巴罗的影子。

当时一位叫卢卡斯的富翁为了支持自然科学研究，给剑桥大学捐了一笔钱，设立了一个叫做“卢卡斯数学讲座”的教席，为数学和物理专业的教授支付薪金。

巴罗是第一任卢卡斯讲座教授，但他看到牛顿的杰出才华后，立刻让贤，把这一讲座教授的位置让给了牛顿。牛顿当时才27岁。牛顿确实身手不凡，他30岁时又当上了皇家学会会员（相当于院士）。

牛顿在《自然哲学之数学原理》（图1-2）中，论述了自己对力学的研究成果，谈到了绝对空间与绝对时间，还谈到相对空间与相对时间。他认为：

“绝对空间，就其本性而言，与任何外部事物无关，它总是相同的和不可动的。相对空间是绝对空间的某个可动的部分或量度……”

“绝对的、真实的和数学的时间自身在流逝着，而且因其本性均匀地、与任何外部事物并不相关地流逝着，它又可以叫做延续性。相对的、表观的和普通的时间是延续性的一种可感知的、外部的（无论是准确的或不均匀的）借助运动来进行的量度，我们通常就用它来代替真实时间；例如一小时、一个月、一年。”

力学的基础，其内容之完善，逻辑之严谨都堪称科学著作的楷模，值得

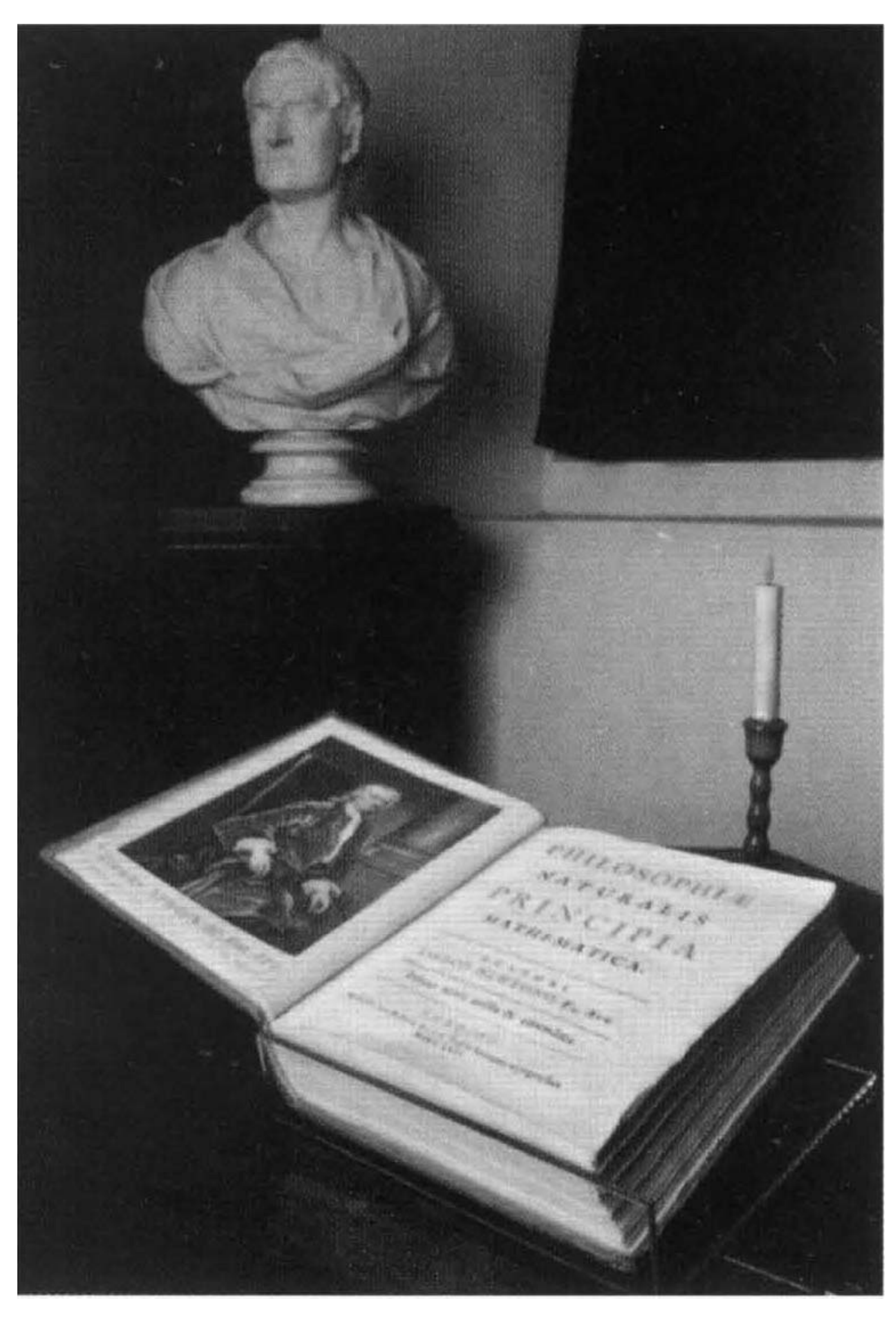


图1-2　《自然哲学之数学原理》第一版

牛顿列出了力学三定律，给出了万有引力定律。这部书奠定了经典力学的基础，其内容之完善，逻辑之严谨都堪称科学著作的楷模，值得

所有热爱物理学的青年学子浏览。

毫无疑问，牛顿是迄今为止最伟大的物理学家之一。

牛顿、胡克与万有引力定律的发现

牛顿时代的天文学家和物理学家，都熟知开普勒通过精细的天文观测得到的行星运动三定律（图1-3）：

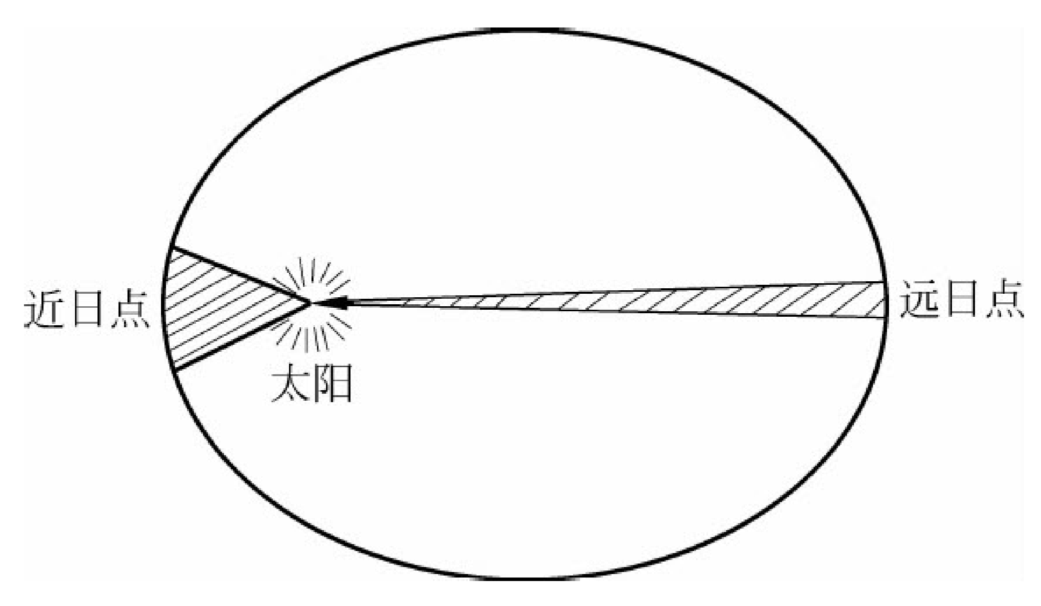


图1-3　开普勒的行星运动定律

第一定律：行星绕日运动的轨道是一个椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上。

第二定律：行星的矢径在单位时间内扫过的面积相等。

第三定律：行星绕日运动周期的平方，与椭圆轨道半长轴的立方成正比。

牛顿和胡克等人几乎同时认识到，如果开普勒第三定律成立，则太阳和行星间的引力就一定与距离的平方成反比。问题是，与距离平方成反比的力是否一定能导致行星运动轨道是一个椭圆？

有一次，哈雷与胡克等人在一起议论这个问题，胡克说，与距离平方成反比的引力，一定能导致行星运动轨道是椭圆，而且声称他证明过这一点。哈雷想看看他的证明，胡克不肯。

于是哈雷又去请教牛顿，牛顿也说，与距离平方成反比的引力一定能导致椭圆轨道，自己也证明过。哈雷说他想看一下牛顿的证明，牛顿当场找了半天，也没有翻出来。不过牛顿答应再证一遍给哈雷看。不久之后，哈雷收到了牛顿的来信，看到了牛顿的证明。

当牛顿发表《自然哲学之数学原理》一书时，遇到了麻烦。胡克说你书中的万有引力定律是我先发现的，于是二人争吵起来，导致书无法出版。牛顿不得不做出让步，在书的序言中被迫写上胡克也是“万有引力与距离平方成反比”的发现者之一。不过，给出万有引力定律的正确而完整表达式（1.1）的人，肯定是牛顿。

$$F = G\frac{Mm}{r^2} \qquad (1.1)$$

牛顿与夫莱姆斯梯德的冲突

除去与胡克争夺万有引力定律的发现权之外，牛顿还与天文学家夫莱姆斯梯德发生了争吵。牛顿在《原理》一书中引用了夫莱姆斯梯德的许多天文观测数据。《原理》一书再版时，牛顿听说夫莱姆斯梯德又有了许多新数据，就向他要，夫莱姆斯梯德不给。牛顿当时已经坐上了皇家学会会长的宝座，傲气十足，就命令夫莱姆斯梯德把数据交出来。夫莱姆斯梯德就是不给，牛顿也没有办法。于是牛顿又想了一招，让他的好友哈雷去向夫莱姆斯梯德借这批数据，哈雷拿到数据后，按照牛顿的主意把这批数据用在自己写的一本书上。牛顿想，哈雷这本书一出版，自己就可以光明正大地引用这批数据了。不料此事被夫莱姆斯梯德觉察到了，他就把哈雷告上了法庭，法庭裁决不许哈雷出版这本“剽窃的著作”。

牛顿一气之下，删掉了《原理》一书中原已引用过的来自夫莱姆斯梯德的所有数据。

夫莱姆斯梯德非常愤怒，此后不再和牛顿讲话。他认为“牛顿是一个阴险的，野心勃勃的、极其贪婪的沽名钓誉者，根本不能容纳不同意见……”，不过他最后还是表现得比牛顿有度量，较为公正地评价了牛顿，“……归根到底是个好人，但生性多疑。”

牛顿与莱布尼茨的争吵

最著名的冲突发生在牛顿与德国数学家莱布尼茨之间，二人争夺微积分的发现权。现在已经清楚，二人是各自独立创建微积分的。牛顿是在研究速度时发现的，莱布尼茨则是在研究切线斜率时发现的。牛顿的发现时间要早一点，但他公布发现的时间晚于莱布尼茨。

当时二人公开争吵，双方的朋友都出来帮忙。牛顿的朋友写文章说是牛顿先创建的，莱布尼茨的朋友则发表文章说是莱布尼茨先创建的。不过后来发现，不少牛顿朋友所写文章实际上是牛顿本人先写好，然后以他朋友的名义发表的。

在争吵中莱布尼茨犯了一个错误。当时英国的科学比德国发达，于是莱布尼茨请求英国皇家学会出面成立一个“公正的委员会”来裁决一下，究竟是谁先发现了微积分。

让莱布尼茨没有想到的是，作为皇家学会会长的牛顿就敢胡来，牛顿以会长身份指定了一个全部由自己的朋友组成的“公正的委员会”，这一委员会“裁决”莱布尼茨剽窃，牛顿还私下为这个委员会起草了裁决书。

委员会裁决之后，牛顿还觉得不解气，又化名写了一篇文章，回顾这件事情的来龙去脉，以彻底把莱布尼茨搞臭。据说，莱布尼茨非常伤心，不久就去世了，牛顿则沾沾自喜。

莱布尼茨是一位才华横溢的学者，他不仅研究数学，还研究物理、哲学、历史、法律、神学和外交。

莱布尼茨与牛顿不仅在微积分的发现权上产生冲突，而且还在哲学和时空观上进行过争吵。牛顿说存在一个“绝对空间”和一个“绝对时间”，莱布尼茨说根本就没有“绝对空间”，也没有“绝对时间”，一切都是相对的。“空间”不过是物体相对位置和方向的表现。时间不过是事件发生的先后顺序的排列。没有物质，就没有时间和空间。



绘画：张京

神坛上下的牛顿

牛顿的科学发现基本上都是在青年和中年时期做出的，他为此付出了艰苦卓绝的劳动。他的秘书曾经回忆牛顿在写作《原理》那段时期的情况："他从不作任何娱乐和消遣，他不骑马外出换空气，不散步，不玩球，也不做任何其他运动。认为不花在研究上的时间都是损失。他常常工作到半夜三更，往往忘记吃饭，当他偶尔在学院的餐厅出现时，常常穿一双磨掉了后跟的鞋，袜子乱糟糟，披着衣服，头发也几乎不梳。"

牛顿的伟大成就对物理学产生了深远的影响。然而中年以后的牛顿，不是一个招人喜欢的人，他很不谦虚，不停地与人争吵，在自然科学上不再有建树。

有人说晚年的牛顿特别想发财，最后终于当上了造币厂的厂长。不过，牛顿确实了不起，他在管理金融时提出的"金本位"主张，对经济产生了深远影响。英镑和美元最硬的时候，都是在它们的币值与黄金挂钩的时候，脱钩后，就不可避免地走向了衰落。所以，"金本位"的主张，值得崛起中的大国深思。

牛顿有一句名言："我之所以有成就，是因为站在了巨人的肩上。"许多人以为这是牛顿谦虚的表现，事实并非如此。这句话是在牛顿给胡克的信中出现的。胡克是个矮子，而且有点驼背。牛顿是想说，我能够做出成就是因为站在了笛卡儿等巨人的肩上，跟你胡克这个矮子无关。

晚年的牛顿也还是有谦虚的时候，不过他敬畏的对象不是某个人而

是自然界。他曾说过：“我不过像一个在海边玩要的小孩，时而发现一块光滑的石子，时而发现一个美丽的贝壳，但真理的广阔海洋，却还在我的面前有待发现。”

如何得出暗星的预言

拉普拉斯和米歇尔是依据牛顿的万有引力定律和力学第二定律预言这类暗星的。他们算出暗星形成的条件是：

$$r \leqslant \frac{2GM}{c^2} \qquad (1.2)$$

其中r、M分别是恒星的半径和质量，G和c分别是万有引力常数和真空中的光速。不过他们当时还不知道c是一个常数，更不知道光速是自然界最高的极限速度。他们以为光速和一般质点的速度一样，在外力下会依据牛顿第二定律而变化。他们认为，如果式（1.2）的条件被满足，这颗恒星的光就会被自身的引力拉回去，成为外界看不见的暗星。

我们从经典力学的动能与势能关系很容易推出此式。设光子的质量为m，则它的动能为$\frac{1}{2}mc^2$；光子位于恒星表面时，万有引力势能为$\left(-G\frac{Mm}{r}\right)$。光子抵达远方的条件是它的动能能够克服势能，如果动能小于势能，远方的观测者就接收不到这个光子了。所以形成暗星的条件可以从

$$G\frac{Mm}{r} \geqslant \frac{1}{2}mc^2 \qquad (1.3)$$

导出，于是我们得到了式（1.2）。

从今天看来，上面的论证有两方面错误，第一是按照狭义相对论，光子动能不是$\frac{1}{2}mc^2$，而是mc^2，而且真空中的光速c是一个常数，不会在外力作用下改变。第二是万有引力与一般力不同，是一种几何效应，万有引力定律只不过是爱因斯坦广义相对论的一个近似。有趣的是，这

两方面的错误相互抵消，式（1.2）与后来从相对论得出的黑洞形成条件恰好一致。

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \tag{1.4}$$

式中，r_g与M分别为黑洞的半径和质量，r_g又称星体的引力半径。

高傲的拉普拉斯

拉普拉斯是当时世界上最杰出的数学家和天体物理学家，他的五卷巨著《天体力学》受到拿破仑的关注。这位关心科学技术的独裁者在翻阅了拉普拉斯的《天体力学》后，召见了自己的这位同胞，问他："这部书中怎么没有提到上帝的作用？"拉普拉斯高傲地回答："我不需要这个假设。"

拉普拉斯在《天体力学》第一版（1796年）和第二版（1799年）中都谈到了自己预言的暗星，但在1808年出版的第三版中却悄悄地删除了有关暗星的叙述。

这是因为在第二版和第三版的出版之间，托马斯·杨完成了光的双缝干涉实验，这表明光是波而不是微粒。拉普拉斯感到自己建立在牛顿微粒说基础上的暗星预言，看来不对了。

托马斯·杨的功绩

英国的托马斯·杨小时候是个神童，长大后成了才子。托马斯·杨2岁时就能读书，4岁的时候把《圣经》通读了两遍，到14岁的时候就学会了拉丁语、希腊语、法语、希伯来语、意大利语、阿拉伯语、波斯语等，会多国的语言。他先是学医，研究近视眼，弄清了散光的原因;又对光学感兴趣了，完成了双缝干涉实验，证明了光是波动，而且是横波，还提出了颜色的三色理论。

托马斯·杨在十来个领域都有贡献。特别滑稽的是，他对考古学也有贡献，他把古埃及的罗塞塔石碑上的文字破译了几个，古埃及文研究的第一次突破就是他首先认出了几个字，当然没有全部突破，但也是一个很重要的进展。

光的波动说和微粒说经历过长时期的争论。最先是笛卡儿、胡克、惠更斯等人提出波动说，认为光是波动。这些人都比牛顿资格老。牛顿在剑桥大学任教后，提出光的微粒说，认为光是微粒。他把论文投给英国皇家学会的会刊，遭到学会干事长胡克的否定。胡克认为光是波动已有定论，牛顿的论文是胡扯，他把牛顿的论文退了回去。

牛顿一气之下，从此以后不再给皇家学会会刊投稿，所以牛顿一生论文发表得很少，他的主要成就都刊登在45岁时出版的《自然哲学之数学原理》和65岁时出版的《光学》这两本巨著中。世间后来流传的一些牛顿的论文如“论运动”等，都截自牛顿与别人的私人通信。

在《光学》一书中，牛顿叙述了自己对光学的研究成果，阐述了光的微粒说。由于他在力学方面的巨大成功，大家相信他对光的论述也应

该是正确的，因为他是伟人。

何况惠更斯学派一直未能解释清楚，作为波动的光为什么一直观察不到干涉现象。这样，牛顿的微粒说就压倒了惠更斯的波动说，这一压倒就是一百多年，直到托马斯·杨完成光的双缝干涉实验。

由于牛顿是伟人，是英国民族的骄傲，所以托马斯·杨在论述波动说时小心翼翼。他一再肯定牛顿的伟大，一再申明自己仰慕牛顿的大名，只是希望自己能对牛顿的失误作一点修正，使牛顿的物理理论更加完美。

但这也不行，托马斯·杨受到来自学术界和社会的双重压力，有人说他的文章“没有任何价值”，他的双缝干涉实验根本“称不上是实验”。托马斯·杨的论文无法发表，只好自费印了一些小册子，但也只卖出了一本。不过，真理是否定不了的。牛顿的微粒说无法解释双缝干涉实验，光的波动说最后还是战胜了微粒说。

奥本海默的暗星

光的波动说战胜微粒说之后，米歇尔和拉普拉斯建立在微粒说基础上的暗星预言，逐渐被人们淡忘。

学术界再次谈论暗星是100多年以后的事。1939年美国物理学家奥本海默和施耐德在研究中子星的时候，用爱因斯坦的广义相对论再次论证了存在暗星的可能性。

广义相对论可以看作万有引力定律的发展和推广。这一理论认为，万有引力不是一般的力，而是时空弯曲的表现。

奥本海默等人用广义相对论算出的暗星形成条件如式（1.4）所示，与米歇尔、拉普拉斯给出的条件一致。但是他们依据的理论已远非拉普拉斯等人依据的经典力学可比，他们认为暗星的存在不是万有引力把光拉了回来，而是星体质量造成的巨大时空弯曲，把光束缚在了暗星内部，无法逃逸。

然而，暗星的“密度”大得几乎无法让人相信，太阳如果形成暗星，半径会从70万千米缩小到3千米，密度似乎会达到每立方厘米100亿吨。这真是一个让人无法接受的“天文数字”！

当时已知密度最大的物质是白矮星上的物质，其密度也不过每立方厘米1～10吨。更为可怕的是，暗星内部的物质似乎都会缩到中心的一点上，形成密度和时空曲率都为无穷大的“奇点”。包括爱因斯坦在内的绝大多数物理学家都不相信宇宙间真会有这样的暗星存在。

不久之后，奥本海默受命主持原子弹的研制，对暗星的研究再次中

断。

1964年前后，美国相对论专家惠勒重新研究了奥本海默的暗星形成理论，并用美国核试验基地的大型计算机作了恒星在万有引力作用下塌缩的模拟计算，确认了中子星塌缩真的会形成暗星。他把这一喜讯告诉了奥本海默，然而当时奥本海默由于被人诬陷泄露原子弹机密，而遭到联邦调查局的反复审查，这使他情绪低落，失去了继续研究暗星的兴趣。

不过惠勒的工作终于引起了相对论界的重视，对暗星的探索重新启动，惠勒还给这种暗星起了个专用的名字叫“黑洞”，于是黑洞一词逐渐传播开来。

第二章　恒星演化，走向黑洞

赫罗图

在远离城市的郊外，仰望晴朗的夜空，可以看到万点繁星。如果使用望远镜，就能更好地欣赏那五颜六色的恒星。它们都是遥远的太阳。

天文学家根据恒星的发光本领（光度）和温度，绘制出一种图，是用制作此图的天文学家赫茨普龙和罗素的名字来命名的，称为赫罗图（图2-1）。此图的横坐标表示恒星的温度，纵坐标表示它们的光度。

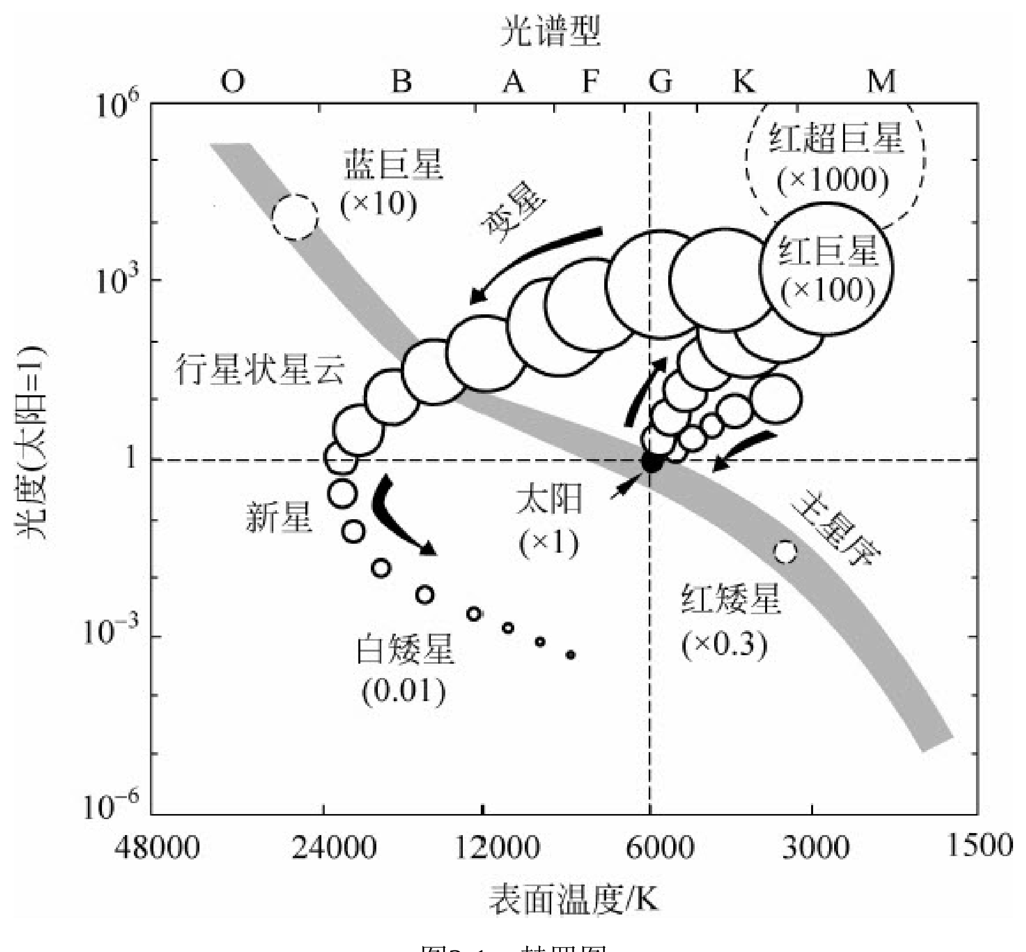


图2-1　赫罗图

恒星的温度可以用它们发射的光的光谱来确定。温度较低的恒星，发射的光波长较长。4000K左右的恒星主要发红光，呈现红色，温度更低的恒星则发射红外线、微波或波长更长的无线电波。6000K左右的恒星主要发黄光，呈现黄色，例如我们的太阳；1万度左右的恒星主要发白光，呈现白色。温度更高的恒星则发射蓝光、紫外线甚至X射线。

肉眼所见的恒星亮度不仅决定于星体自身，而且决定于它们离我们的远近。同样种类和大小的恒星，离我们越近，显得越亮。我们感兴趣的不是这种视亮度，而是恒星的“绝对亮度”。通过天文测量，可以知道恒星离我们的距离。我们把所有恒星都折算到离我们10个秒差距的距离（1秒差距≈3.259光年），它们这时候显示给我们的亮度，称为绝对亮度，它反映恒星的真实发光本领——光度。

赫茨普龙和罗素根据不同恒星的光度和颜色，把它们一一标记到赫罗图中。结果显示，大多数恒星都分布在从左上角到右下角的对角线附近，形成一个恒星比较集中的带，称为主星序。主星序上的恒星称为主序星，我们的太阳就是一颗主序星。还有一些恒星分布在主星序的两侧，有体积较大温度较低的红巨星，有体积较小温度较高的白矮星，此外还有蓝巨星、红矮星等。

吻我一下吧，仙女！

根据恒星光谱中某些谱线的特征，天文学家把恒星分成O，B，A，F，G，K，M等若干种光谱型，标记在赫罗图上方。这些光谱型的排列顺序较为难记，有人编了一个笑话来帮助记忆，说有一个青年第一次来到天文台，用望远镜来看夜空，那五颜六色的天体让他惊叹，不禁喊了一声：

Oh，be a fine girl，kiss me！

“哦，真像一个美丽的仙女，吻我一下吧！”这句话每个英文单词的第一个字母恰好表示按顺序排列的光谱型。

研究表明，恒星在赫罗图中的位置，显示它们的不同演化阶段。主星序上的恒星比较年轻。老年的恒星逐渐离开主星序，先演化成红巨星或超红巨星，再进一步演化成白矮星或者其他致密星。

爱丁顿的贡献

最初，物理学家们认为恒星发光发热的能量完全来自引力势能。他们认为在气体星云收缩为恒星时，气团的引力势能会转化为热能，使恒星温度升高，发光发热。不过，他们认为，此后维持这一发光发热过程的能量依然来源于引力势能，来源于恒星物质的继续收缩。也就是说，引力能是恒星热能和光能的唯一来源。著名物理学家开尔文和亥姆霍兹等人就持这种观点。

然而，后来发现恒星的寿命很长，达到几十亿年，恒星物质的引力势能远不能维持如此长时间的发光发热。于是英国天体物理学家爱丁顿提出，恒星的能量源泉是核的聚变反应（即通常所说的热核反应），是4个氢核聚合成氦核的聚变反应。

当时核物理学尚不发达，许多核物理学家认为氢核（质子）所带的正电荷会同性相斥，它们不可能聚合到一起。要使质子靠近，需要给它们提供足够的动能，也就是说，恒星温度要非常高，而当时估计的恒星温度远没有这样高。

针对核物理学家认为恒星温度不够高，不可能形成氢聚合成氦的热核反应的观点，爱丁顿高傲地回答：“我们不同那些说恒星温度不够高的批评者争辩，我们只告诉他们，往前走，去找到为什么会有更高温度的理由。”

历史表明，爱丁顿是对的，恒星的收缩的确可以使其中心的温度非常高，同时压强非常大，使得质子的动能达到足以克服它们之间的静电斥力，相互靠近而发生热核反应的程度。而且，随着核物理学的发展，

人们认识到，当质子、中子等核子趋近到10^{-15}m（原子核大小）的时候，会出现一种远比静电斥力强大得多的吸引力——核力（即强相互作用力）。正是这种核力把质子、中子聚拢在一起，形成稳定的原子核。

爱丁顿使学术界认识到，恒星的能源不是引力势能，而是聚变反应释放的核能。万有引力势能的作用仅限于“点火”，即原来温度不高，不会产生聚变反应的恒星物质，在万有引力作用下收缩，引力势能转化为热能，使恒星温度不断升高，压强不断增大，直到恒星中心部分的温度和压强达到了诱发热核反应的程度，完成聚变反应的点火。此后，恒星发光发热的能源就不再是引力能，而是核能了。

现在知道，以太阳为代表的主序星的热核反应为

$$4H \quad He + 2e^{+} + 2v + \text{能量}$$

即4个氢核（质子），聚合生成一个氦核（由两个质子和两个中子组成）、两个正电子e^{+}（与通常我们熟悉的电子类似，只不过带的是正电荷）和两个中微子v，并释放出核能。

霍伊尔的贡献

天体物理学家霍伊尔发展了爱丁顿的思想，他首先认识到氦元素还能发生进一步的聚变反应，生成碳元素、氧元素；碳和氧等又可再进一步聚变，生成更重的元素，例如铁、硅等。这不仅解释了恒星发展各个阶段的产能机制，例如白矮星、中子星的形成，以及超新星爆发过程，而且解释了宇宙中重元素的来源。

大家知道，宇宙初期只存在氢和氦两种元素，但今天的宇宙中存在各种重元素（铁、硅等），这些重元素从哪里来？天体物理学家原本不清楚，霍伊尔的工作解开了这一秘密。不过最初的研究是令人沮丧的。

人们发现，两个氦核聚合的生成物（4个质子与4个中子），或者一个氦核与一个氢核聚合的生成物（3个质子与2个中子）均不稳定，这样的聚变反应不可能发生。3个氦核聚合在一起生成的碳（6个质子与6个中子）倒是稳定的，但3个核同时碰在一起的概率很低，这样的反应似乎更难发生。这一严重困难被霍伊尔解决了。

霍伊尔猜测，碳核可能存在一种激发态，其能量恰好与3个氦核加起来的总能量相等，这时在3个氦核与激发态碳核之间会发生一种“共振反应”，使聚合概率大大提高。生成的激发态碳核又会很快跃迁到基态，形成稳定的碳核。这样氦聚合成碳元素的聚变反应就得以进行了。

一些核物理学家最初不相信霍伊尔的猜测，但他们查找后，真的发现存在这种碳的激发态，确认了“共振反应”的存在。大家终于明白了，通过“共振反应”，氦可以进一步聚合生成碳，释放出大量核能。而且碳还可以与氦再进一步聚合成氧。

研究表明，氧还可以再进一步与氦聚合……这样一步步聚合下去，生成各种重元素。各种元素与氦或氢进一步聚合，生成更重的元素，都是可以进行的。各级聚变反应就像一架天梯，每种元素的核与一个氦核或一个氢核聚合，就迈上一个梯级，聚合成更重元素的核。

不过，这架天梯的最下面两级却是残缺的，即两个氦核的聚变不会发生，氦核与氢核的聚变反应也不会发生，天梯中原子量为8或5的梯级都不存在。不过，再往上，天梯就比较完美了，聚变反应可以步步升级，生成的重元素的种类也越来越多。

我们看到，爱丁顿与霍伊尔对天体物理学的贡献是巨大的。不过，伟人也会犯错误，后面我们会看到爱丁顿与霍伊尔的失误。

恒星的演化

现在我们就来简介一下恒星的演化历程，它们如何形成，如何成长，又如何衰老，如何消亡（图2-2）。

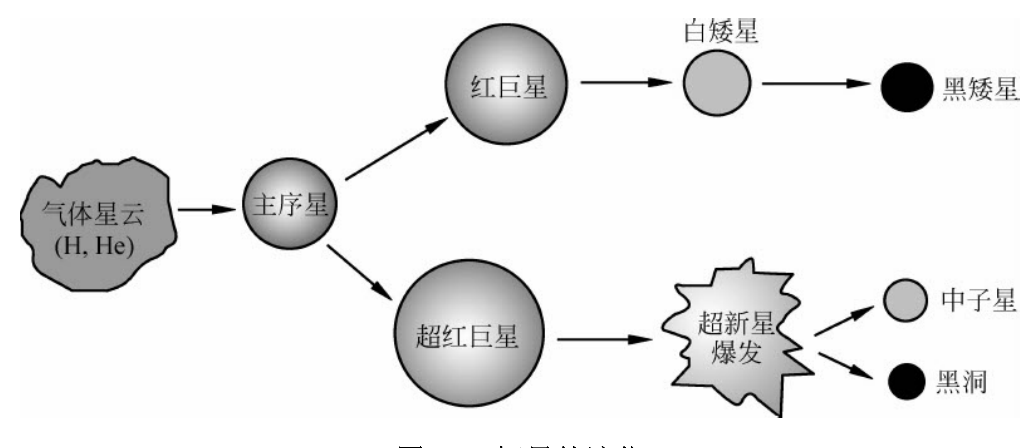


图2-2　恒星的演化

宇宙刚诞生的时候，处在温度极高的状态，最初形成的元素是氢。氢核在高温下发生聚变反应，形成氦核。随着宇宙的不断膨胀，气体的温度逐渐降低，氢聚合成氦的热核反应逐渐停止下来，这时宇宙中的元素大约有70％多的氢和20％多的氦。

这种混合气体不是绝对均匀也不是绝对静止的，随着涨落变化，气体开始聚集成团，并在万有引力的作用下逐渐收缩。在收缩过程中，万有引力的势能逐渐转化成热能，这些气团的温度开始升高，大的气团的中心部分温度可达几千万度，上亿度，压强也可达几千亿个大气压。

在这种高温高压状态下，气团的中心重新开始了氢聚合成氦的热核反应，发出大量的光和热，成为年轻的恒星，于是恒星诞生了。

这些年轻的恒星处在赫罗图的主星序中，称为主序星。我们的太阳

就是一颗主序星。恒星将在主序星阶段持续生存几十亿年到几百亿年。在这个阶段，恒星内部的热核反应相对稳定，发出稳定的光和热。

当主序星内部的氢基本烧完，基本转化成氦以后，外层的氢开始燃烧（聚变），这时恒星开始膨胀，温度也略有降低，成为体积庞大的红巨星或超红巨星。

红巨星和超红巨星的中心部分聚集着大量的氦，这些氦的温度逐渐降低，在万有引力作用下，会进一步收缩，并点燃由氦聚合成碳和氧的聚变反应。

质量小于8个太阳质量的主序星会演化成红巨星，红巨星再演化成由碳和氧两种元素构成的白矮星，它们靠电子之间泡利不相容原理的斥力支撑，成为高密度的白矮星。白矮星密度可达每立方厘米1～10吨。

质量大于8个太阳质量的主序星会演化成超红巨星，超红巨星的中心部分在聚变反应形成碳和氧后，由于万有引力巨大，电子间的泡利斥力支撑不住万有引力的挤压，恒星不会停留在白矮星状态，还会发生进一步的聚变反应，形成铁、硅等重元素，并发生猛烈的爆炸，即超新星爆发，最终形成中子星、黑洞，或全部炸飞而不留残骸。

几种恒星的比较

总之，恒星演化的晚期会经过红巨星（或超红巨星）阶段形成白矮星、中子星或黑洞。

研究表明，剩余残骸质量不超过钱德拉塞卡极限（$1.4M_{\odot}$，$M_{\odot}$为太阳质量）的恒星会形成白矮星。

质量超过钱德拉塞卡极限的恒星会形成中子星，这是一种靠中子间泡利斥力支撑的恒星，密度高达每立方厘米1亿～10亿吨。质量超过奥本海默极限（$2\sim3M_{\odot}$）的恒星，自然界中没有任何力可以支撑，将塌缩成黑洞。

表2-1以太阳为例给出了几种恒星密度与半径的比较。太阳半径70万千米，密度与水差不多，约为每立方厘米1.4克。

表**2-1**　恒星密度与半径的比较

	太阳	白矮星	中子星	黑洞
半径	70 万千米	1 万千米	10 千米	3 千米
密度	1.4 克/立方厘米	1 吨/立方厘米	3 亿吨/立方厘米	100 亿吨/立方厘米

太阳演化成白矮星后，半径缩小到1万千米，密度约为每立方厘米1吨。如果形成太阳质量的中子星，半径约为10千米，密度为每立方厘米1亿～10亿吨。太阳质量的黑洞，半径为3千米，“密度”约为每立方厘米100亿吨。图2-3给出了各种恒星大小的比较。

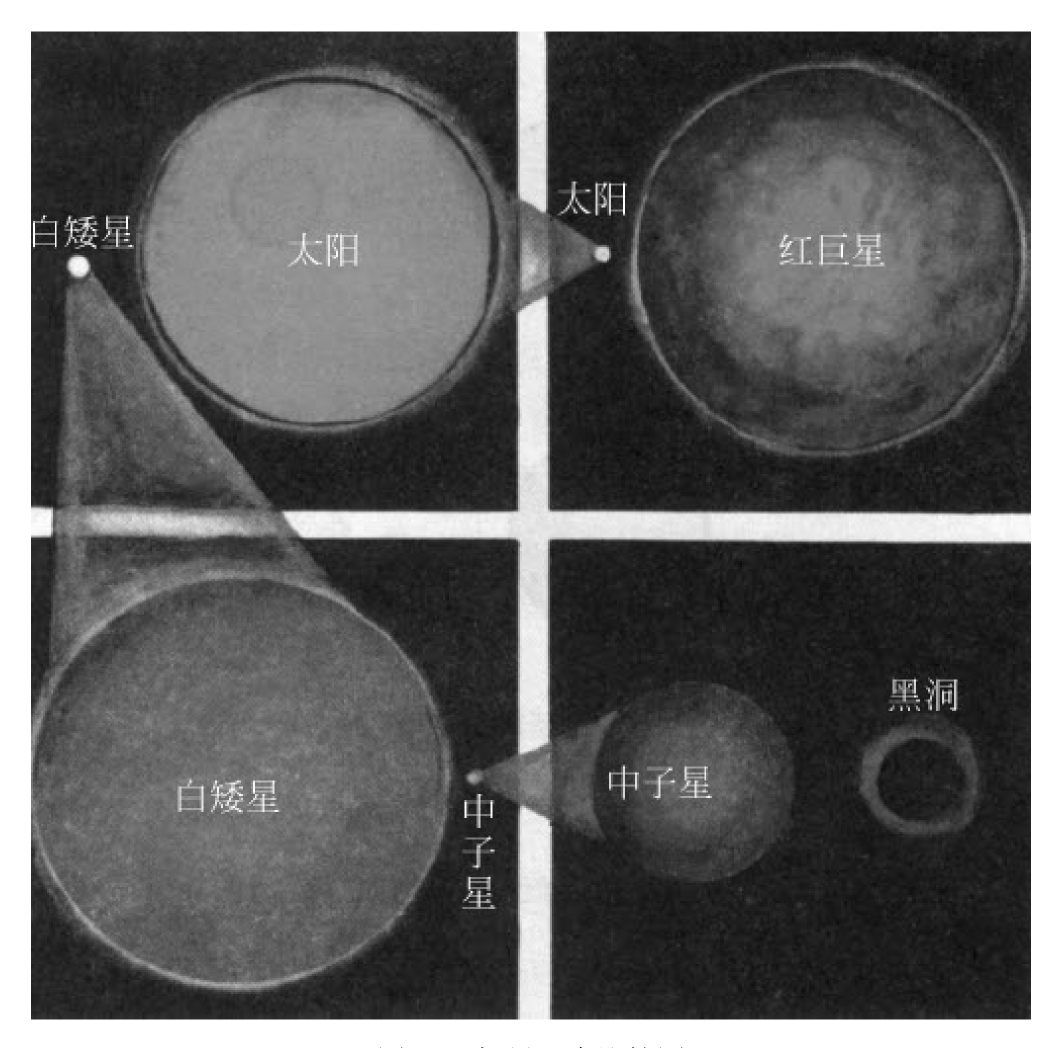


图2-3　恒星尺度比较图

这里有两点需要说明。首先，太阳演化的最终结局是白矮星，不可能是中子星或黑洞。质量最小的中子星或黑洞要由8个以上太阳质量的主序星演化而成。

其次，下面我们会谈到，黑洞内部基本上是真空，物质都聚集在黑洞中心、体积为无穷小的奇点上，所以谈论黑洞的密度实际上没有意义。

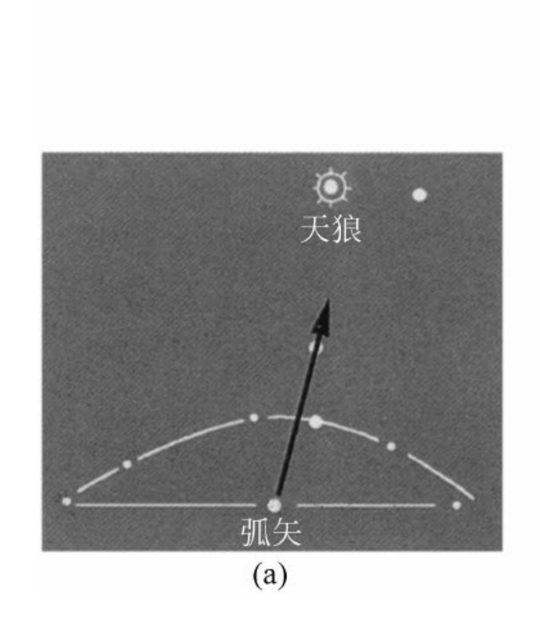
弧矢射天狼

白矮星首先是在天文观测中发现，然后才由理论解释清楚的。

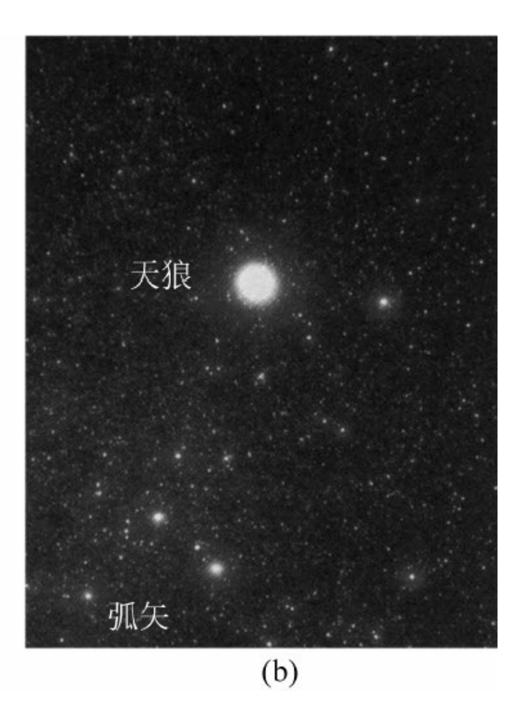
冬季黄昏以后，在天空的东南方有一颗很亮的恒星，那就是人类看到的除太阳外视亮度最大的恒星，中国人称为天狼星。西方人称为大犬座α星。

古希腊人按照他们的神话，把天空中的繁星分成几十个星座，例如猎户座、英仙座、仙女座、大熊星座等，每个星座中最亮的一颗称为该星座的α星，其次为β星，再次为γ星等。大犬座α星就是大犬座中最亮的一颗恒星。

中国古代认为天狼星代表侵略，天狼星的左下方有一组星，连起来好像弓箭，中国人称为“弧矢”，“弧矢”射“天狼”，表示反击侵略（图2-4）。



(a)



(b)

图2-4　弧矢射天狼

屈原的诗中有“举长矢兮射天狼，操余弧兮反沦降”。苏东坡的诗中也有“会挽雕弓如满月，西北望，射天狼”。这是因为北宋时主要敌人是西夏，西夏在大宋国的西北方。另外，从天空看，虽然天狼星始终出现在天空的南部，但它位于弧矢星的西北。

白矮星的发现

大家知道，天空中的星体，除去太阳、月亮和金、木、水、火、土五颗行星外，它们在天空的相对位置都不变化，所以古人称它们为恒星。也正是因为恒星间的相对位置不变，它们才能形成固定的星座。

实际上，肉眼所见的恒星，都是银河系中的星体，都在一刻不停地围绕银河系的中心转动。不过这些恒星都离我们太远了，最近的也距离我们4光年以上，也就是说光从那里走到地球需要4年以上的时间。由于它们离我们太远，所以我们不可能在较短的时间内察觉到它们的位置变化。想要明显看出它们位置的变化，一般要几万年才行。

图2-5给出了北斗七星现在以及十万年前和十万年后的相对位置。如果今天让一位天文学家冬眠，十万年后再让他苏醒过来，恐怕他那时要辨认出天上群星的名字就非常困难了。

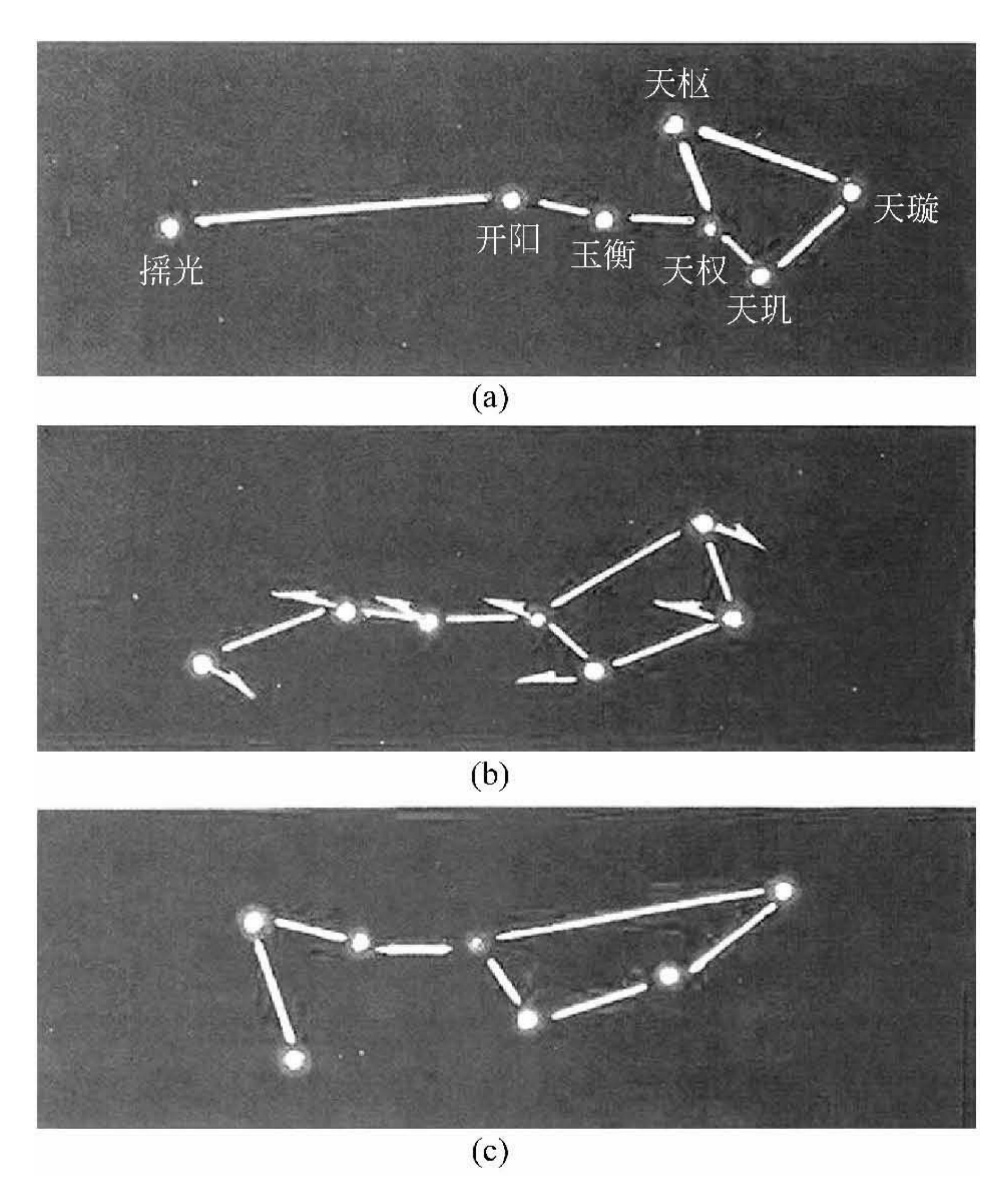


图2-5　北斗七星在天空中位置的变化

不过，天狼星离我们比较近，大约9光年。由于它离我们近，所以它的位置变化就比较容易发现。天文学家在1834年就发现它在绕一个小圆圈作周期运动。它为什么要转圈呢？

当时的物理学家已经知道万有引力定律，那必定是因为天狼星还存在一个看不见的伴星，它们两个在围绕共同的质心转动。有人打了一个

比方说，这就像一对青年男女在跳舞，男孩子穿一身黑礼服，女孩子穿一身白色纱裙。当灯光暗下来的时候，人们就看不见那个男孩子了，只看见一个女孩子在转圈。她为什么转呢？因为有个东西在吸引着她。

28年后，天狼星的这颗伴星被观测到了，称它为天狼B星，而天狼星本身则称为天狼A星（图2-6）。它们组成一个有两个太阳的太阳系——双星系。实际上，像我们的太阳系这样只有一个太阳的太阳系是少数，大多数太阳系都有两个以上的太阳。有两个太阳的称为双星，有多个太阳的称为聚星。

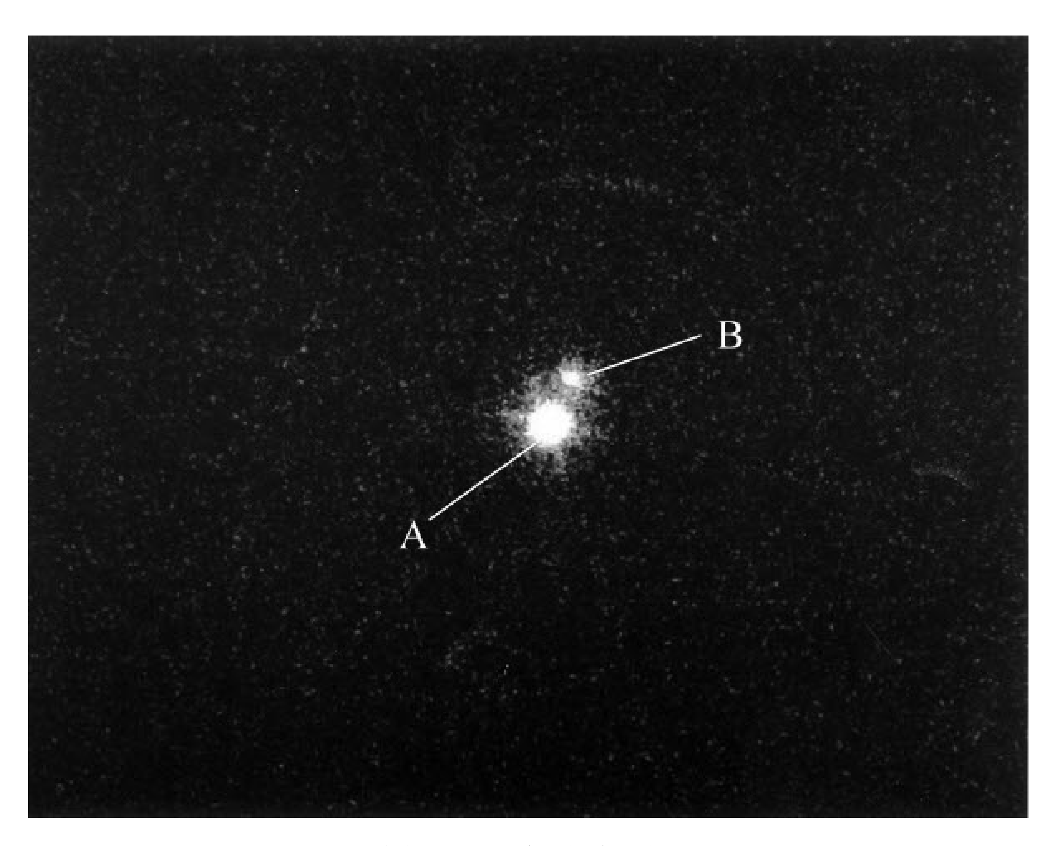


图2-6　天狼A星与B星

天狼B星个子很小，发白光，温度约2万度。令人惊讶的是它的密度极高，大约为每立方厘米2.5吨。我们的太阳系中不存在这样的物质，地球上密度最大的物质也不过每立方厘米几十克。天文学家们觉得天狼

B星的密度太惊人，简直不可思议！

经过一段时间的研究，人们逐渐明白了，构成天狼B星的是一种特殊物质。

从主序星到红巨星

图2-7是我们观测到的一颗红巨星——心宿二。它是中国古代命名的二十八宿中“心宿”里的一颗，质量比太阳略大一点。从图2-7中可以看出，它非常巨大，能把火星轨道都包进去。

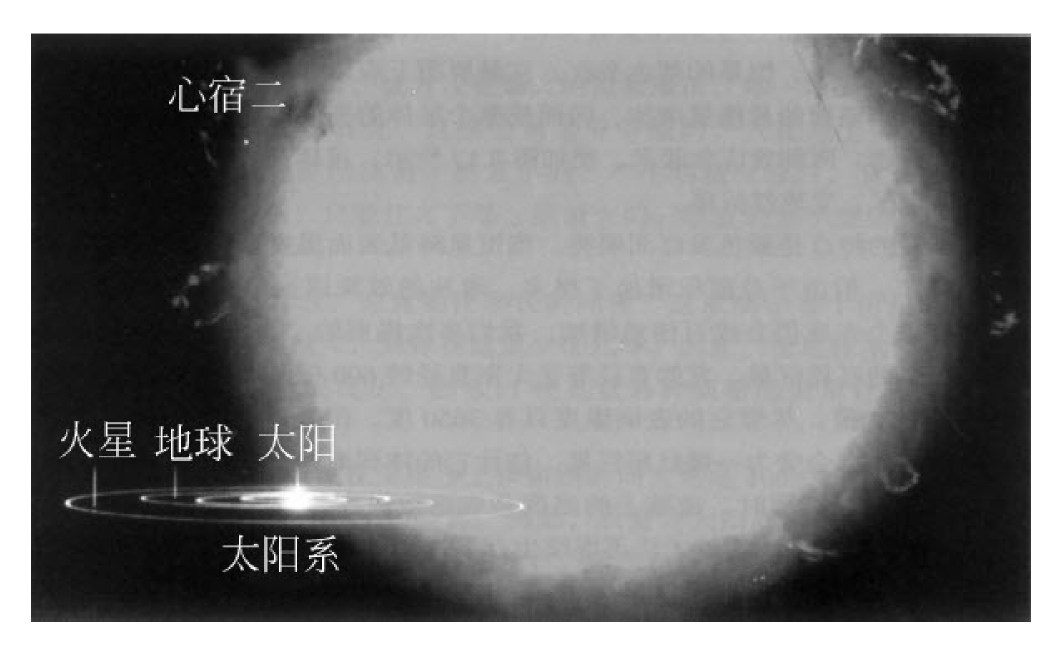


图2-7　红巨星心宿二与太阳系的比较

我们的太阳将来也会形成红巨星，大小与心宿二差不多。那时太阳中心部分的氢都已聚合成氦。热核反应扩展到外层，太阳的体积逐渐增大，温度逐渐降低，颜色变得越来越红。膨胀的太阳逐渐扩展到水星轨道，把水星吞到肚子里；再扩展到金星轨道处，把金星也吞进去；把地球上的江河湖海全烤干，然后把地球也吞进去，最后扩展到火星轨道处。

这时水星、金星和地球都在太阳的肚子里围着太阳的核心转。这是因为红巨星虽然温度达到4000度，体积很大，但除去核心部分之外，密度都极小，气体稀薄到比我们实验室所能制造的真空密度还稀，所以行

星能够长时间在红巨星的肚子里转，不会落向星体的中心。但那时地球上的生命肯定已荡然无存。

不过，大家不要担心。我们太阳在主序星阶段的寿命是100亿年，现在才过了50亿年，太阳正在年富力强的中年时期，演变成红巨星是50亿年以后的事情。未来的50亿年中，太阳将维持现在这种状态，所以大家尽可以放心地活着。

那么，50亿年以后怎么办呢？我们的子孙后代怎么办呢？没有关系。大家想一想，现代自然科学从哥白尼开始至今才500年，人类已经可以登月了，太阳演化到红巨星还需要50亿年的时间，那时的人类科学会有多么发达！

那时人类说不定早已移居到银河系中年轻的太阳系去生活了，甚至可能在地球上修个“喷嘴”，装好足够的燃料，再把绝大多数人类和生物“冷冻”起来，空气也冷冻到地球的表面上，只留下几个专业小组驾驶地球。“轰”的一下瞬间将地球像火箭一样发射出去，飞向事先考察确定的、适合人类生存的年青的太阳系，然后重新唤醒人类，继续在那里生活。

有人说，这简直是天方夜谭！我要说，这确实是幻想，但是是有道理的科学幻想。总之，50亿年后人类的命运用不着我们杞人忧天。

从红巨星到白矮星

前面谈到，红巨星的中部聚集着聚变反应后由氢生成的氦，外部的氢继续进行着聚变反应，生成的氦不断落向中部，使氦组成的中心部分质量不断增加，引力不断增加，温度不断增高，终于点燃了由氦聚合成碳的新的聚变反应。

这时红巨星的核心部分温度突然升高到1亿度左右，于是白矮星就形成了。白矮星周围的气体形成“行星状星云”（图2-8），这些星云逐渐扩散开去，最后只留下孤独的白矮星。

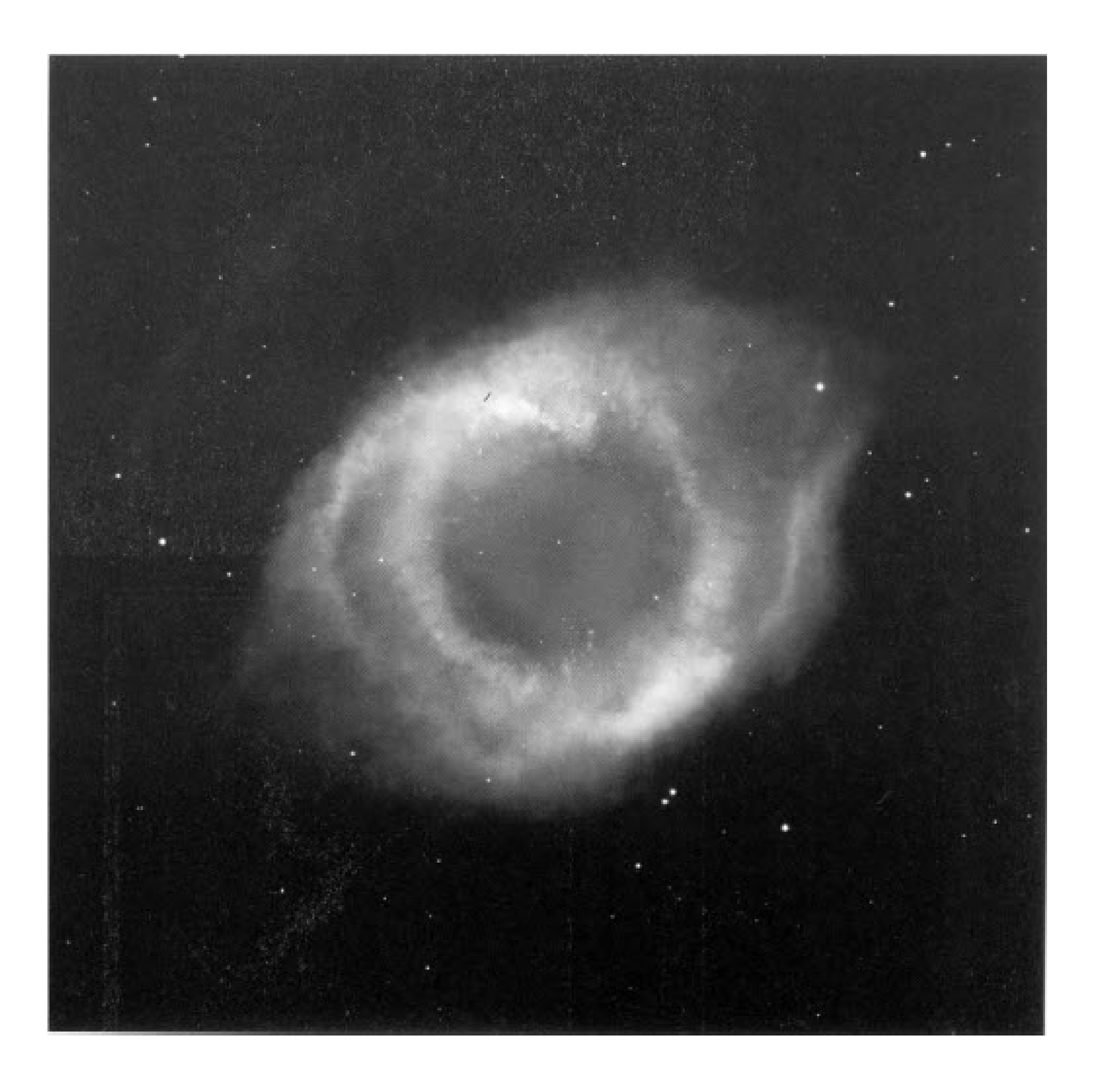


图2-8　行星状星云

大家知道，行星之所以不在万有引力作用下收缩为一个点，是因为原子靠得很近后，原子外部的电子云分布会发生变化，同种电荷互相靠近，静电斥力增加。万有引力越大，原子之间靠得越近，电子之间的静电斥力就越大。电磁力的排斥效应与万有引力的吸引效应相平衡，就使行星达到稳定的状态。

恒星的情况与行星不同，它们的温度很高，热排斥效应很强，这种热排斥与万有引力相抗衡，能够使恒星处于稳定状态。主序星和红巨星就是这种情况。

然而白矮星质量很大，密度很高，热排斥和电磁排斥效应都不足以抗衡它自身的万有引力。那么它靠什么来支撑呢？

研究表明，这时原子核外的电子壳层会被挤碎，使得电子能够在原子核形成的晶格内自由运动，或者说晶格似乎漂浮在电子的海洋中。这时电子间靠得很近，产生一种新的排斥效应——泡利不相容原理导致的排斥力。

泡利不相容原理是在研究原子结构时提出的。为了解释原子核外电子的排布，德国物理学家泡利提出如下原理：每个电子状态只能容纳一个电子。原子的每根电子轨道上有两个状态，所以每根轨道上只能存在两个电子。他把这一原理应用到玻尔的轨道模型上，给出了原子核外电子的壳层分布，成功地解释了元素周期律和光谱线。

后来的研究表明，一根轨道上的两个电子状态对应着电子的不同自旋。继而费米用统计理论阐明了半整数自旋的粒子（电子、中子、质子等）遵守泡利不相容原理的原因。

现在，这一原理又被用来解释白矮星物质中的强大斥力。上面已经说过，白矮星物质密度极大，电子壳层被挤碎，电子间靠得非常近。由于出现两个以上的电子挤占同一个状态的情况，于是相互间就会产生泡利斥力，这种力比热排斥和电磁排斥力都强。白矮星就是靠着这种泡利斥力的支撑，而不在强大的万有引力下塌缩的。

电子自旋的发现

首先想到同一轨道上的两个状态对应电子自旋的是泡利自己，但他很快又放弃了。他认为“自旋”这种概念来自经典物理，在量子理论中应该彻底放弃经典概念。所以放弃了电子有自旋的想法。

不久之后，美国青年物理学家克罗尼格产生了同样的想法，他跑去告诉泡利。泡利回答说：“你的想法很聪明，可惜大自然不喜欢它。”于是克罗尼格也放弃了自己的想法。

又过了一段时间，著名物理学家艾伦菲斯特的两个学生乌伦贝克和高斯密特也产生了类似的想法。艾伦菲斯特支持他们的想法，建议他们把稿子投给《自然》杂志，然后又建议他们去请教一下洛伦兹。

洛伦兹与他们都生活在荷兰。他们去后，洛伦兹说，我实在太忙，这样吧，你们把论文先放在我这里，我抽空看一下，你们过些日子再来。几天后，他们又去见洛伦兹，洛伦兹拿出一沓写满计算式的纸张交给他们，说：“恐怕有问题，如果电子有自旋，电子边沿的速度将超过光速，这违背相对论。”洛伦兹原先反对过爱因斯坦的相对论，现在态度转了180°，又赞同相对论了。

听了洛伦兹这番话，这两位觉得糟糕了！赶紧找老师艾伦菲斯特商量补救办法。老师建议他们赶快要求杂志社退稿，杂志社却答复：“十分抱歉，你们的稿子已经付印了，以后你们一定要注意，确定论文没有问题后再投稿。”为此，他们二人十分沮丧，老师安慰说，你们还年轻，发点错误文章没有关系，来日方长。

此后不久，玻尔到荷兰访问，艾伦菲斯特带着这两个学生到轮船码

头接玻尔。两位先生在前面走，他们二人帮玻尔提着皮箱，闷闷地在后面跟着。玻尔问艾伦菲斯特，你这两个学生好像有什么心事，不大高兴啊？艾伦菲斯特把他们投稿的事告诉了玻尔。

玻尔一听，说：“电子有自旋？这个想法很好啊！至于超光速的问题可以暂时先不管。”玻尔的称赞顿使乌伦贝克和高斯密特欣喜若狂。

这篇文章登出后，海森堡立刻写信给他们表示赞同，爱因斯坦也对他们的工作大加赞赏。

实际上，乌伦贝克和高斯密特的文章基本是正确的，当时出现超光速的问题是因为把电子的半径估计得太大了。事实上，电子非常小，至今还没有测出电子的半径。当然“自旋”这个概念，恐怕也确实不能像经典物理那样去理解。

文章发表前后，乌伦贝克和高斯密特的情绪经历了坐过山车一样的起伏，但他们终于没有错过“电子自旋”这一杰出的发现。

从白矮星到黑矮星

综上所述，白矮星靠着泡利斥力与万有引力相平衡，保持稳定状态。印度物理学家钱德拉塞卡的研究表明，质量小于1.4$M_{\odot}$的白矮星将来会一直维持这种稳定状态，并逐渐冷却，形成黑矮星。

黑矮星实际上是由碳和少量的氧组成的巨大金刚石，在宇宙空间飘荡。谁要弄到一颗黑矮星，或者其上的一块物质，就足以发大财了。只可惜到今天为止，虽然发现了大量的白矮星（大约占恒星总数的十分之一），但还没有找到一颗黑矮星。这是因为白矮星冷却成黑矮星大约需要100亿年，我们宇宙的寿命至今才137亿年，可能一颗黑矮星都还没有形成。

白矮星的质量上限

然而，白矮星并不是所有恒星晚期的唯一归宿。印度青年物理学家钱德拉塞卡发现，残余质量超过1.4个太阳质量的白矮星状态的星体，由于万有引力过大，电子之间的泡利斥力将抵抗不住引力的吸引，星体将继续塌缩。

钱德拉塞卡有着极好的数学物理基础，他在研究中认识到，当万有引力迫使电子相互靠近时，电子运动速度将被迫加快，对于质量超过$1.4M_\odot$的白矮星状态的星体，电子运动速度会接近光速，形成相对论性电子气，这时它们的泡利斥力会突然减弱，于是星体将不可能停留在白矮星状态，而会继续塌缩。

因此，钱德拉塞卡得出结论，白矮星存在一个质量上限——$1.4M_\odot$。宇宙间不存在超过这个质量上限的白矮星。这个上限，后来被称为钱德拉塞卡极限。

钱德拉塞卡在印度大学毕业后，打算到英国去学习天体物理。他是在从印度到英国的旅行途中，在航船上完成这一发现的。

到了英国后，钱德拉塞卡与一些天体物理学家讨论了这一发现，后来又去征求著名天体物理学家爱丁顿的意见。他满以为爱丁顿会赞赏他的发现，没想到爱丁顿认为他的结论是错误的，让他好好检查一下自己的计算。此后他反复检查，都没有发现错误。然而几次找爱丁顿谈，都被爱丁顿不假思索地否定。

最后，爱丁顿看钱德拉塞卡一直坚持自己的结论，就对他说：不久

将在伦敦举行一次天体物理讨论会，你可以在会上报告一下你的工作，我可以运用我的影响，给你争取双倍的发言时间，让你充分讲解一下自己的工作。

开会的前一天，钱德拉塞卡与爱丁顿一起共进晚餐。钱德拉塞卡问爱丁顿：“您明天也有报告吗？”爱丁顿说：“有。”“什么名称呢？”“与你的报告名称一样。”钱德拉塞卡马上紧张起来，他觉得，爱丁顿是不是要抢夺自己的研究成果了。

第二天，轮到钱德拉塞卡作报告了，他向与会者散发了自己报告的预印本。他报告完之后，爱丁顿走上了讲台，他发言称：“钱德拉塞卡刚才的报告完全是错误的。”说着就把手中拿着的钱德拉塞卡的论文预印本撕碎。

爱丁顿认为，如果钱德拉塞卡的论文正确，白矮星将塌缩成一个点，一个物质密度和时空曲率都为无穷大的点，难道自然界存在这样的物理状态吗？谁看到过？所以，钱德拉塞卡的工作肯定是错误的。

由于爱丁顿的崇高威望，所有与会者都相信，钱德拉塞卡闹了个大笑话。散会时，一个朋友走到他身边，对他说：“钱德拉塞卡，这次糟透了，实在糟透了。”

其实，爱丁顿从未仔细阅读过钱德拉塞卡的论文，并没有发现论文的计算中真的有什么错误。他只是简单地分析了一下，就武断地否定了钱德拉塞卡的工作。爱丁顿之所以底气很足，还有一个原因，就是爱因斯坦赞同他的看法。

钱德拉塞卡24岁时做出这一发现，73岁时因为这一发现获得了诺贝尔物理学奖。钱德拉塞卡获奖后没几年就去世了。险些错过获奖的机

会，因为诺贝尔奖只颁发给活着的科学家。

不过，在获奖之前好多年，钱德拉塞卡的研究成果就已经得到了学术界的承认。在一次研讨会上，他走到泡利身边，请他看一下自己的论文。泡利拿过来一看，说："这篇文章我看过。"他问："您觉得我的文章怎么样？"泡利说："很好啊。"钱德拉塞卡说："爱丁顿教授说我的文章不满足您的不相容原理。"泡利说："不，不，不。你的文章满足我的不相容原理，可能不满足爱丁顿不相容原理。"

泡利很少赞扬别人的工作，这次赞扬了钱德拉塞卡，但把爱丁顿讽刺了一下，可能他认为爱丁顿有种族歧视。应该说明的是，后来爱丁顿也承认了钱德拉塞卡的结论是正确的，并向他道了歉。

对中子星的预言

超过1.4$M_{\odot}$的恒星是否就真的会塌缩成一个点呢？研究的结果并非如此。在万有引力的强大压力下，电子会被压入原子核中，与核里的质子“中和”成中子，形成一颗主要由中子构成的星——中子星。

这种星靠中子之间的泡利斥力来支撑。中子间的泡利斥力比电子间的泡利斥力大，可以支撑住质量不超过2～3个太阳质量的星体。这个质量上限称为奥本海默极限，是美国物理学家奥本海默首先给出的。

由于中子物质的物理状态研究起来很困难，目前还没有得到公认一致的物态方程，所以奥本海默极限的值不像钱德拉塞卡极限那么肯定，只能确定在2～3$M_{\odot}$范围内。超过这一极限的星体，中子间的泡利斥力顶不住万有引力，星体将塌缩成黑洞。

下面我们来介绍一下中子星的预言和发现。为此我们首先要介绍一下中子的发现。早在20世纪20年代，英国物理学家卢瑟福就怀疑原子核中是否存在一种质量与质子相似，但不带电的粒子。他是从元素原子序与原子量的关系作出这一猜测的。

例如氦元素，原子序为2，原子量为4。原子序2对应氦核中的两个质子，它们拥有2个单位的原子量，余下的2个单位原子量是什么贡献的呢？作出贡献的物质应该不带电，很像两个不带电的质子。卢瑟福猜测，这种未知粒子可能是电子和质子靠得非常近而形成的一种复合粒子。

1930年，普朗克的研究生波特在用α射线轰击铍时，发现了一种穿

透力很强的不带电的射线，他认为是γ射线（波长很短的电磁波）。

约里奥·居里夫妇（即居里夫人的大女儿和大女婿）对此进行了仔细研究，发现这种射线能够从石蜡中打出质子。他们也认为这是一种波长极短的γ射线。他们二人学化学出身，在研究中没有从物理的角度多加考虑。实际上，如果从能量守恒和动量守恒考虑，波长再短的γ射线也不可能从石蜡中打出质子。

卢瑟福的学生查德威克正在根据老师的猜测寻找中子，没有找到。这时他看见了约里奥夫妇的论文，真是喜出望外："他们看见了中子还不知道。"于是他设计了类似的实验，报告自己发现了中子，先发一篇短文《中子可能存在》登在了《自然》杂志（*Nature*）上，接着发了一篇长文《中子是存在的》，登在英国皇家学会会报上。于是中子被发现了。

约里奥夫妇十分懊恼，他们错过了伟大的发现。正如法国著名微生物学家巴斯德所说："机遇只钟情于有准备的头脑。"他们的头脑没有准备，没有中子这个概念。不过，他们没有停止不前，而是继续努力，很快发现了人工放射性，即用人工方法制出了放射性元素。此前发现的放射性元素都是天然的。

1935年，诺贝尔奖评委会一致认为，中子的发现应该获奖。有人主张应该由查德威克和约里奥夫妇分享这次的诺贝尔奖，但评委会主任是查德威克的老师卢瑟福。他说："约里奥夫妇那么聪明，他们以后还会有机会的，这次的奖就给查德威克一个人吧。"于是，查德威克因为中子的发现获得了1935年的诺贝尔物理学奖。

当年下半年评化学奖，物理学奖与化学奖是由同一个委员会评，大

家一致同意把当年的诺贝尔化学奖授予约里奥夫妇，理由是“发现人工放射性”。其实，大家也在想：中子的发现他们也有一份功劳。

1954年，波特也因为宇宙线的研究获得了诺贝尔物理学奖，评委会大概也考虑了他对中子发现的贡献。这下皆大欢喜，4个对中子发现有贡献的人，都获得了诺贝尔奖，相当公平。

约里奥夫妇在发现人工放射性后，又首次观察到了核裂变，此后又首先提出，并在实验中观察到铀元素裂变的链式反应，打下了制造原子弹和核反应堆的理论基础，为人类利用原子能作出了重大贡献。

1932年，当发现中子的消息传到丹麦首都哥本哈根时，玻尔把理论物理研究所的人都聚集到一起，让大家畅谈一下发现中子的感想。当时，在那里访问的苏联青年物理学家朗道做了一个即席发言。他认为，宇宙中可能存在主要由中子构成的天体，这是对“中子星”最早的预言。此后，许多物理学家对这一问题进行了深入的研究。

脉冲星-中子星

然而中子星的发现则是30年之后的事情。1967年，英国天体物理学家休伊士和他的女研究生贝尔，在用射电天线对天空作巡天观测时，偶然发现了中子星。

我们看见的天体，都是发可见光的。但是有的天体只发无线电波，不发可见光。还有的既发无线电波又发可见光。来自空间的无线电波可以给我们提供许多信息，于是天文学家设计了一些天线装置，专门用来接收来自宇宙空间的无线电波。休伊士设计了一组天线阵，希望全面收集来自宇宙空间的无线电信号。为此他计划做“巡天观测”，即把天空划分成一个个天区，一个一个去扫描接收。他把这个任务交给了贝尔（图2-9）。



图2-9　休伊士、贝尔与他们的天线阵

夏天的一个夜晚，贝尔突然发觉接收的噪声背景中似乎隐藏着微弱的信号，她反复观测反复处理，终于发现确实存在着有规则的脉冲信号。她立刻打电话给自己的老师休伊士，休伊士赶来分析后，确认这是一种来自宇宙深处的规则脉冲。

他们原以为这是外星人在和我们联络，就给这一发现起了个代号叫“小绿人”。后来发现此脉冲信号非常规则，频率和振幅都毫不变化，不可能负载“外星人”的信息。而且不久之后又发现了几个这样的无线电波源，不可能有这么多有智慧的“小绿人”在联络我们。

后来弄清楚了，这是一种以前不了解的星体，它们发出频率严格不变的脉冲，于是称它们为脉冲星。再后来，人们终于弄清楚了，脉冲星就是中子星。

巨大的主序星塌缩成中子星时，恒星具有的磁场在星体塌缩过程中依然保持。但由于恒星体积大为缩小，原来主序星表面并不惊人的磁场在中子星表明显得异常强大，使得大量电子围绕磁力线转动，产生沿磁轴方向的电磁辐射。这种辐射非常强大，就像探照灯的光柱一样射向宇宙深处。

与普通恒星一样，中子星的磁轴与自转轴一般不重合，于是这些“光柱”就随着中子星的自转而在空间中扫描，每扫描地球一次，我们就接收到一个脉冲（图2-10）。

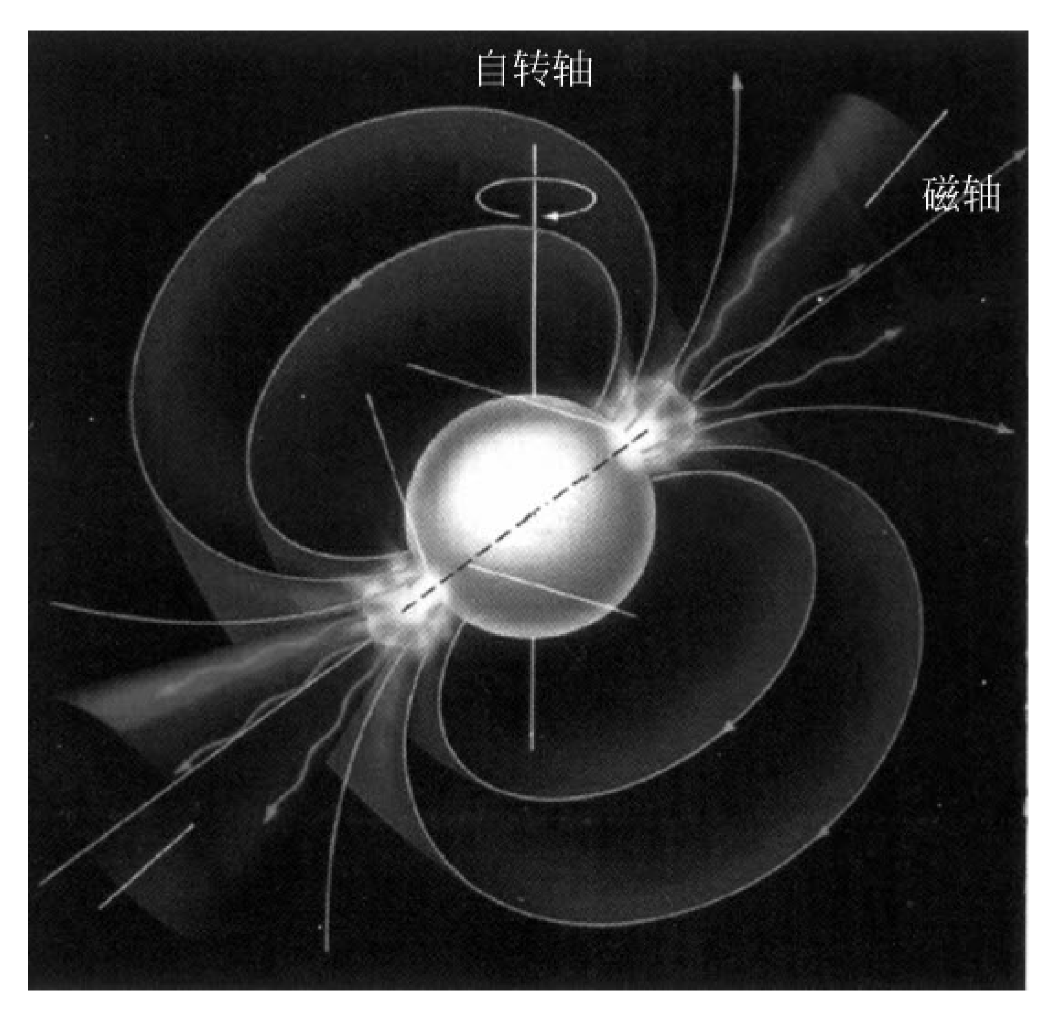


图2-10　脉冲星-中子星

主序星塌缩成中子星时，转动惯量大为减小，但角动量必须守恒，所以中子星的自转角速度极高，可达每秒几百圈，因此地球上观测到的、“光柱”扫描产生的脉冲频率很高。

这就是休伊士和贝尔发现的脉冲星，它们本质上是中子星。科学家终于发现了30多年前就已预言的中子星。

近年来的研究表明，中子星具有复杂的结构。它的主体部分由中子态物质组成，但会有大约百分之一的质子，以及数目相同的电子。

这是因为自由中子不稳定，会衰变成质子和电子，这百分之一的质

子，填满了中子可以衰变“抵达”的“基态”，使中子处于稳定状态，不再衰变。中子星外层有一个处于白矮星状态的铁壳，有人认为星体的中心部分还可能处在“夸克态”，好像是一锅“夸克汤”。

中子星表面温度极高，可达上千万度。由于引力巨大，中子星表面很平，最高的“山峰”也不过10cm。中子星的大气层很薄，也只有大约10cm。

不公平的颁奖

1974年，诺贝尔奖评委会为脉冲星的发现颁奖，奖金只给了休伊士一个人，忽略了贝尔。这件事在天体物理界引起了轩然大波，许多人为贝尔抱不平。休伊士出面说，他认为诺贝尔奖只颁给自己一个人是对的，因为天线阵是自己设计的，观测任务是自己布置给贝尔的，贝尔只不过是个执行者。

但许多专家认为，休伊士布置的任务只是一般的巡天观测，只是寻找众所熟知的那些射电源，并没有让贝尔寻找脉冲星。而脉冲星是一类原来未知的、非常特别的射电源，而且其信号极其微弱，如果不是贝尔细心观测，认真从噪声中提取信号，此发现很有可能会错过。

贝尔则表现得十分有涵养，从来没有批评过她的老师，也从来没有为自己申诉，这更加受到天体物理界学者们的同情。一些人对休伊士忿忿不平，霍金干脆在自己著作中叙述脉冲星发现的地方，只放了贝尔一个人的照片，并称她是脉冲星的发现者。

诺贝尔奖评委会对此事没有再说什么，但在以后的颁奖中注意了不应忽略学生的贡献。

超新星爆发

对于中子星的研究，我们中国人是有贡献的。那是在宋朝的时候。宋仁宗至和元年，中国的天文学家观察到一次超新星爆发（图2-11）。中国古代称超新星为“客星”，就是在本来观察不到恒星的天空位置，突然出现了一颗亮星，过了一段时间后，它又暗下去，逐渐消失。



凡十一日没三年三月乙巳出東南方大中祥符四年正月丁丑見南斗魁前天禧五年四月丙辰出軒轅前星西北大如桃速行經軒轅太星入太微垣掩右執法犯次將歷屏星西北凡七十五日入濁没明道元年六月乙巳出東北方近濁有芒彗至丁巳凡十三日没至和元年五月己丑出天關東南可數寸歲餘稍没熙寧二年六月丙辰出箕度中至七月丁卯犯箕乃散三年十一月丁未出天囷元祐六年十一月辛亥出參度中犯掩側星壬子犯九游星十二月癸酉入奎至七年三月辛亥乃散紹興八年五月守婁

宋史志卷九　二十五

图2-11　宋史中关于1054年超新星的记录

宋仁宗就是中国戏剧小说中“狸猫换太子”的那个太子。他在位的40多年，是北宋经济、文化最繁荣的时期。

至和元年，即公元1054年，中国人发现在“天关”附近出现了一颗客

星，有23天时间白天就能看见，像太白金星（即启明星，长庚星）那样亮。后来又有一二年时间晚上还能看见，再后来就消失了。日本、越南、朝鲜的古籍中也记录了这颗超新星，但没有指明方位，只有中国人准确地指出了它出现在天空的位置。

超新星，其实就是恒星的爆炸。超红巨星演化的晚期，聚集在星体中心的氦越来越多，先发生聚变反应，形成由碳和氧组成的白矮星状态的物质。由于这类恒星的质量巨大，一般超过8个太阳的质量，聚集在星体中心的碳和氧的数量超过钱德拉塞卡极限，电子的泡利斥力顶不住万有引力，所以星体会进一步收缩，温度达到30亿度左右，爆发碳、氧聚合成铁、硅等重元素的聚变反应。

随后，白矮星状态的铁核会进一步收缩升温，能在0.1秒的时间内升到50亿度，形成中子态的物质，这时星体外层的白矮星状态的铁壳层会突然塌缩，砸在中子态的核上，然后反弹出去，形成大爆炸。这就是外界观察到的超新星爆发。

超新星爆发把重元素崩向宇宙空间，其中许多被年轻的恒星吸引了过去，围绕这些“太阳”转，逐渐形成固体的行星。事实上，所有固体行星，包括我们的地球，都是超新星爆发的渣子堆积而成的。宇宙中原本只有氢、氦等轻元素，生成白矮星时开始出现碳和氧，超新星爆发过程才产生了铁、硅等重元素，并把它们抛向广阔的宇宙空间。

没有超新星爆发，就没有重元素，没有固体行星，当然也就不可能出现人类。超新星对于宇宙的演化、生命的出现和演化都是极为重要的。

除了为生命提供重元素，为人类提供“立足之地”外，超新星爆发还

会影响生物的进化。爆发时产生的强大辐射流，会使一些生物灭绝，同时为新物种的诞生和进化创造条件。地球上发生过若干次类似于恐龙灭绝这样的物种突变，造成这种突变的可能原因之一，就是在离我们太阳系较近的地方，发生了超新星爆发。

蟹状星云

1731年，英国的一位天文爱好者（一位医生），在金牛座中发现一个螃蟹状的星云（图2-12）。200年后一位西方天文学家和一位汉学家联手研究后，认识到这个星云就是1054年超新星爆发的遗迹。这里面传教士功不可没。明清时期，许多西方传教士来到中国，其中不乏有帝国主义的走狗，但大多数还是虔诚的基督徒，他们为宣传基督教来到中国，在传教的同时也为中国带来了西方的天文学和数学知识。



图2-12　蟹状星云

有些传教士在中国人的帮助下把有关的书籍翻译成中文，同时也把中国的历史文化介绍给西方，其中包括中国丰富的历史记录，于是包括关于“至和元年客星（即1054年超新星）”的许多天文记录传到了西方。传教士们的活动，极大地促进了中西方文化交流，使中国人大开眼界，也使西方人大开眼界。

1928年，天文学家哈勃测出了蟹状星云的膨胀速度，这个由气体和尘埃组成的星云，正在以1100千米/秒的速度扩散。星云的中心有一颗小暗星。1944年，人们认识到这颗小暗星和蟹状星云都是1054年超新星爆发的遗迹。从这个星云的膨胀速度不难反推出，组成星云的气体和尘埃正是1054年左右从那颗小暗星处喷出的。

中子星与黑洞的形成

更为惊人的是，1968年，天文学家们发现这颗小暗星是一颗脉冲星，人们终于认识到脉冲星（中子星）是超新星爆发的产物。如果没有中国古代的有关记录，得到这一结论还不知道要等到什么时候。

超新星爆发并不常见，我们银河系大约每100年爆发4颗。超新星爆发的规模非常大，超新星在一天里发出的光，相当于太阳在一亿年内发出的光。一颗超新星的亮度往往可以比一个星系（一般有上千万颗恒星）发的光还亮，从图2-13就可以看出。超新星与整个星系亮度的比较。图（a）是超新星爆发前的情况，图（b）是超新星爆发时的情况。

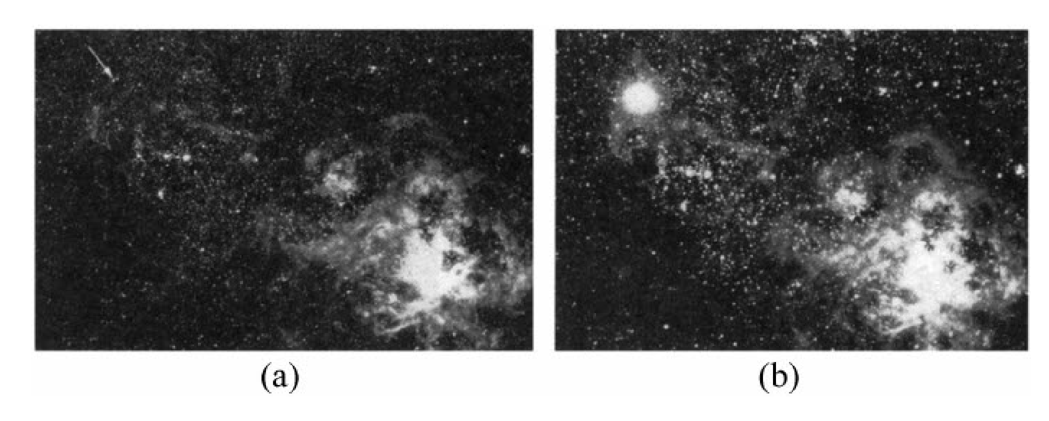


图2-13　超新星与星系亮度的比较

少年时代的我第一次听说超新星爆发时，不少天没有睡好觉。担心太阳如果超新星爆发怎么办，人类不就灭亡了吗？后来看到一些书上讲，太阳大小的恒星不会超新星爆发，才安下心来。真是杞人忧天啊！科学告诉我们，只有超过太阳质量8倍的主序星，演化到晚期时，才可能发生超新星爆发，我们的太阳是绝对安全的。

研究表明，除去形成中子星外，超新星爆发还可能形成黑洞。爆发时残留质量超过奥本海默极限的星体，中子间的泡利斥力抵抗不住万有

引力，星体将塌缩到它的引力半径r_g之内，即事件视界之内，形成黑洞。

Ⅰa型超新星和宇宙的加速膨胀

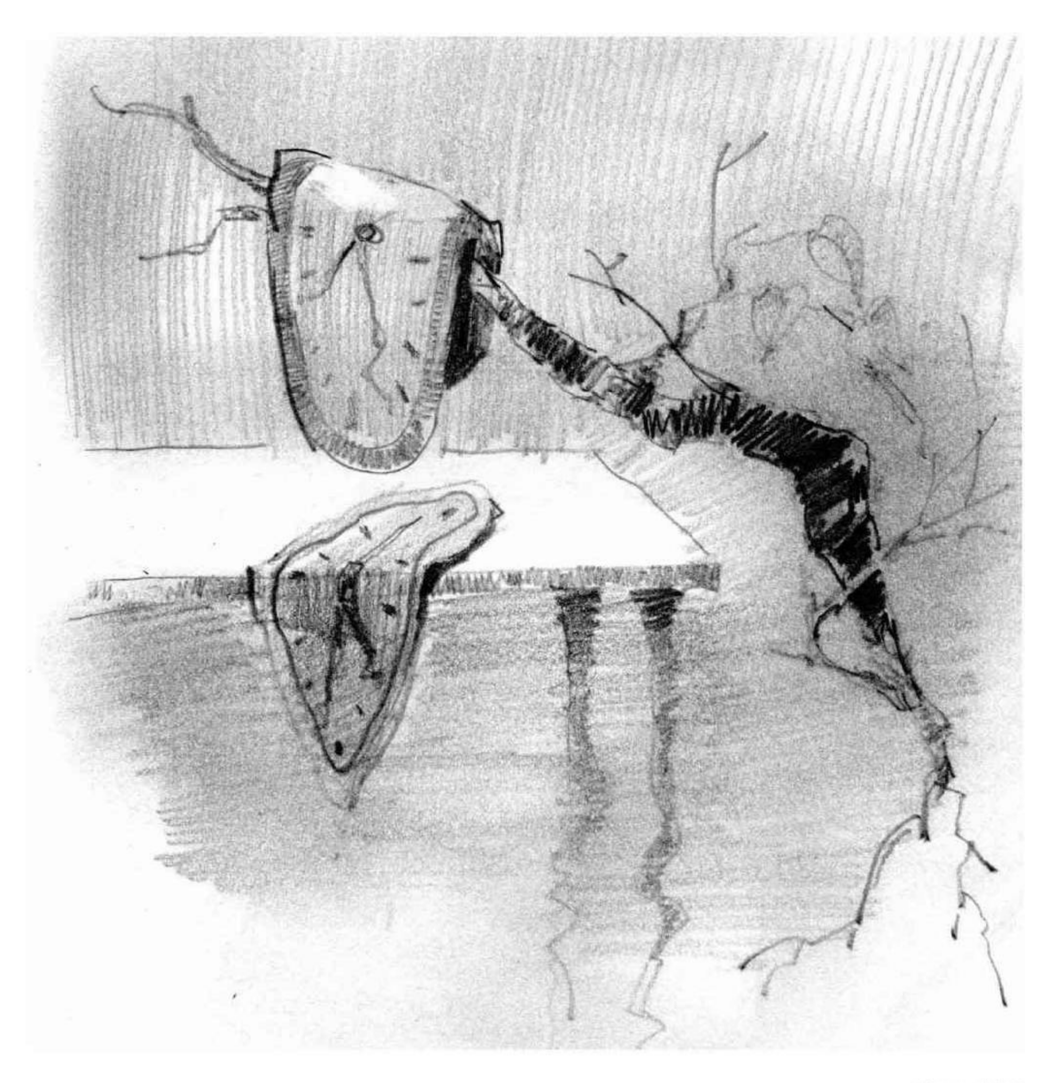
此外，还有一种超新星，即Ⅰa型超新星，它爆发时全部炸光，不留残骸。这是一种特殊的星体，它原本是一颗白矮星，质量小于钱德拉塞卡极限1.4$M_{\odot}$，本来不会超新星爆发。

但是这种白矮星处在一个双星系（由两颗恒星组成的太阳系）或一个聚星系（由多颗恒星组成的太阳系）中，它吸积其他恒星的气体，形成吸积盘。气流物质在吸积盘上边旋转边落入白矮星，使它的质量逐渐增加。当白矮星的质量超过1.4$M_{\odot}$时，电子间的泡利斥力抵抗不住万有引力，于是这颗星塌缩并爆炸了。由于它的质量不足以形成中子星或黑洞，于是全部炸飞，不留残骸。

Ⅰa型超新星的研究使科学家重新确认了远方星系离我们的距离，认识到我们的宇宙在60亿年前从减速膨胀变成了加速膨胀，从而造成了世人皆知的暗能量疑难。

暗能量是一种在宇宙空间均匀分布的、透明的、压强为负的物质，它在宇宙中的密度不发生变化，使得宇宙在膨胀过程中内部的暗能量越来越多，产生的负压强越来越大，终于排斥效应超过了万有引力的吸引效应，从而使宇宙从减速膨胀变成了加速膨胀。通过前面的讨论，我们从天文学的角度，从恒星演化的角度看到了黑洞形成的可能性。目前白矮星与中子星都已经发现了。大小与中子星差不多大的黑洞似乎不应该不存在。

下面，我们将把讨论的注意力，集中到本书的主题黑洞上。为此，我们先介绍一下黑洞的理论基础——广义相对论。



绘画：张京

第三章　弯曲的时空

爱因斯坦1915年完成的广义相对论是“关于时间、空间和引力的理论”。这一理论可以看做万有引力定律的发展，它认为万有引力不是一般意义上的力，而是一种几何效应，是时空弯曲的表现。

狭义相对论的成就

1905年，爱因斯坦在“相对性原理”和“光速不变原理”的基础上导出“洛伦兹变换”，建立起相对论（即今天所说的狭义相对论）的大厦。他给出了惯性系中“动尺缩短”、“动钟变慢”、“质能关系$E=mc^2$”、“双生子佯谬”等重要而新奇的结论。相对论突破了牛顿理论的框架，展现出全新的物理体系和全新的时空观。

爱因斯坦指出，自己的相对论与牛顿的经典物理学的关键差别不在“相对性原理”，而在“光速不变原理”。因为伽利略早就正确地阐述了相对性原理，牛顿在自己的力学中也应用了这一原理。只是洛伦兹等人为了解释迈克耳孙实验，对相对性原理产生了怀疑，把水搞得有点浑。爱因斯坦说，我本人只是坚持了这一原理，并无特别的创新。第三章弯曲的时空看不见的星：黑洞与时间之河

爱因斯坦认为，自己最大的突破是认识到光速是绝对的，真空中的光速不仅在同一惯性系中是均匀各向同性的，而且与观测者相对于光源的运动速度无关。

上句话的前一半说“光速在同一惯性系中均匀各向同性”，这是一个“约定”，即“规定”。只有做了这一“约定”，才可以校准不同地点的钟，从而可以在全空间定义统一的时间（这一点我们将在第九章作详细讨论）。应该说，这一约定是建立相对论的前提。

“光速不变原理”则是指上句话的后一半，“光速与观测者相对于光源的运动速度无关”。这一原理的意思是，相对于光源静止的观测者，迎着光束以速度v_1相对于光源运动的观测者，以及顺着光的前进方向，

以速度v_2远离光源的观测者，测到的真空中的光速都是同一个c值。这确实是让人难以理解的。

而且，承认“光速不变原理”，就意味着必须承认“同时”这个观念不再是绝对的，而成了相对的。这就是说，在高速行驶的火车上，车上的人认为车头与车尾“同时”发生的两件事，在静止于地面上的观测者看来，不再是同时发生的。当然，由于火车速度不够高，在日常生活中这一效应看不出来，但是如果火车速度接近光速，这一效应将十分明显。

理解“光速的绝对性”，及其导致的“同时的相对性”，是十分困难的，这个难题曾经困扰了爱因斯坦很长时间，大约在一年以上。他一想通这点，所有的问题就迎刃而解了，“动钟变慢”、“动尺收缩”等相对论效应就都自然得出了。

洛伦兹与庞加莱都曾十分接近相对论的发现，但他们都没有认识到“光速不变原理”，没有谈论过、也根本没有想到过“同时”这个概念会是相对的，从而与相对论的发现失之交臂。

洛伦兹与庞加莱为相对论的发现做了许多奠基性的准备，但他们都因为没有认识到“光速不变原理”，而没能跨入相对论的大门。所以爱因斯坦是相对论的唯一创建人。

狭义相对论的困难

正当全世界为相对论的成功而欢欣鼓舞时，爱因斯坦本人却冷静地看到了自己的理论存在严重缺陷。

首先，作为“相对论”基础的惯性系，现在无法定义了。牛顿认为，存在绝对空间，所有相对于绝对空间静止和作匀速直线运动的参考系都是惯性系。爱因斯坦的相对论认为不存在绝对空间，牛顿定义惯性系的方法显然不适用了。

有人建议，把惯性系定义为，不受力的物体在其中保持静止或匀速直线运动状态的参考系，也即把牛顿第一定律（即惯性定律）视作惯性系的定义。

但是，什么叫不受力呢？有人以为，一个物体不与其他的物体接触，就肯定不受力。这种想法不对，因为自然界中还存在看不见摸不着的各种场，例如，引力场、电磁场等，它们都可能对物体“施力”。

也许有人会说，如果物体在惯性系中，保持静止或匀速直线运动的状态，就可以定义为“不受力”。读者一下就会看出，这里存在逻辑上的循环。定义“惯性系”要用到“不受力”。定义“不受力”，又要用到“惯性系”。这样的定义方式，在物理学中是不可接受的。

爱因斯坦注意到的另一个缺陷是，万有引力定律写不成相对论的形式。有几年，爱因斯坦致力于把万有引力定律纳入相对论的框架，几经失败后，他终于认识到，相对论容纳不了万有引力定律。

这两个缺陷非常严重。他的相对论是研究惯性系之间的关系的，也

就是说，相对论是建立在惯性系的基础上的。现在，这个“基础”居然无法定义！另一方面，当时已知的力只有电磁力和万有引力两种，竟然其中的一种就放不进相对论的框架中，真是太令人遗憾了！

走向新理论的第一步：广义相对性原理



在布拉格，1912 年

图3-1　研究广义相对论时的爱因斯坦

爱因斯坦反复考虑狭义相对论遇到的两个基本困难：①惯性系无法定义；②万有引力定律纳不进相对论的框架。他想，既然惯性系无法定义，不如就抛开惯性系，把自己的理论建立在“任意参考系（包括非惯性系）”的基础之上；把原来的相对性原理：“物理规律在一切惯性系中都相同”推广为“物理规律在一切参考系中都相同”。他把后者称为广义相对性原理，以别于原来的相对性原理。这样做确实躲开了定义惯性系的困难，但又产生了新的困难：非惯性系与惯性系不同，它有惯性力存在。如何处理惯性力呢？爱因斯坦想到了牛顿的水桶实验，以及牛顿和马赫对惯性力起源的不同看法。

牛顿的水桶实验

牛顿为了论证绝对空间的存在，曾设计了一个著名的思想实验：水桶实验。

一个装有水的桶，最初桶和水都静止，水面是平的（图3-2（a））。然后让桶以角速度ω转动，刚开始时，水未被桶带动，这时候，桶转水不转，水面仍是平的（图（b））。不久，水渐渐被桶带动而旋转，直到与桶一起以角速度ω转动，此时水面呈凹形（图（c））。然后，让桶突然静止，水仍以角速度ω转动，水面仍是凹形的（图（d））。

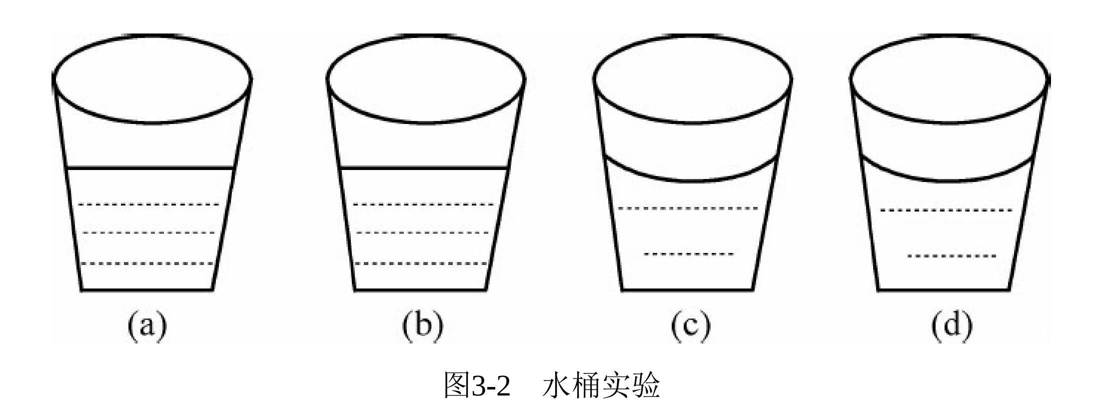


图3-2　水桶实验

（a）桶与水都静止；（b）桶转水未转；（c）水与桶一起转；（d）桶静止水转

在情况（a）和情况（c）中，水相对于桶都静止，但水面在情况（a）时是平的，在情况（c）时是凹的。而在情况（b）和情况（d）中，水相对于桶都转动，但水面在情况（b）时是平的，在情况（d）时是凹的。

显然，水面的形状与水和桶的相对转动无关。水面呈凹形是由于受到惯性离心力的结果。惯性离心力的出现既然与水相对于桶的转动无关，那么与什么有关呢？牛顿认为，与绝对空间有关。惯性离心力产生

于水对绝对空间的转动。牛顿认为，转动是绝对的，只有相对于绝对空间的转动才是真转动，才会产生惯性离心力。推而广之，加速运动是绝对的，只有相对于绝对空间的加速才是真加速，才会受到惯性力！　　通过水桶实验，牛顿论证了绝对空间的存在。

走向新理论的第二步：马赫原理

奥地利学者马赫只是一个三流的物理学家，他对物理学的具体贡献不大，主要是在流体力学中提出了“马赫数”。但是他敢于向“祖师爷”挑战，敢于批判牛顿，说牛顿的时空观不对。马赫的观点对青年爱因斯坦产生了深远的影响。

马赫认为根本就不存在什么绝对空间，一切运动都是相对的。他认为牛顿对惯性力起源的解释是错误的。马赫认为惯性力起源于物体间的相对加速，起源于作相对加速的物体之间的相互作用。

我们通常所说的受到惯性力的加速物体，是由于它相对于宇宙中的所有物质加速，这相当于该物体不动，整个宇宙的物质相对于它作反向加速。全宇宙的物质通过这种加速共同对该物体施加了“作用”，这种“作用”就是惯性力。

水桶实验中受到惯性离心力的水，是由于它相对于整个宇宙中的物质转动，这相当于水不动，全宇宙的物质相对于水反向转动，在这种相对转动中，全宇宙的物质都对水施加了“作用”，这一作用的表现就是惯性离心力。如果水只相对于桶转动，而相对于宇宙中的其他物质不转，虽然桶对水也施加了影响，但桶的质量与整个宇宙的质量相比微乎其微，转动的桶对水的“作用”也就微乎其微，所以这时水不会受到惯性离心力。

马赫这种认为惯性效应起源于物体之间的相对加速，从而起源于物质间的相互作用的思想，被爱因斯坦称为马赫原理。马赫原理并没有严格的物理陈述，更没有数学表达式，它只是一种定性的物理思想。

正是马赫的这一思想，给了爱因斯坦重要的启示，引导爱因斯坦提出等效原理，并进而建立起广义相对论的大厦。在广义相对论取得巨大成功之后，爱因斯坦高度评价马赫的这一思想，认为自己的广义相对论具体体现了马赫原理预期的效应。

不过，后来的深入研究表明，广义相对论与马赫原理并不一致。有趣的是，当时马赫还活着。马赫看到了狭义相对论，但据说没有看到广义相对论。马赫断然否认自己的思想与相对论一致，明确反对爱因斯坦的相对论。这一点令爱因斯坦十分遗憾。

然而，有一点可以肯定，马赫认为“不存在以太和绝对空间，一切运动都是相对的”，这一思想引导爱因斯坦走上了创立狭义相对论的正确道路；马赫认为“惯性效应起源于物质间相对加速产生的相互作用”的思想，又导致爱因斯坦猜测惯性力可能与万有引力有相同或相似的根源，都起源于物质间的相互作用，从而引导爱因斯坦走上了创立广义相对论的正确道路，所以，马赫原理在历史上的贡献是应该肯定的。

引力质量与惯性质量

此外，爱因斯坦注意到惯性力的一个重要特点：惯性力与物体的惯性质量成正比。这个特点与万有引力非常相似，万有引力与物体的引力质量成正比。

在《自然哲学之数学原理》一书中，牛顿把质量定义为物体所含物质的多少。他说，质量就是物质的量，它等于密度和体积的乘积，并与物体的重量成正比。这样定义的质量，称为引力质量（m_g）。在这本书的另一处，牛顿又谈到物体的质量与它的惯性成正比。也就是说，他认为，使不同物体在外力作用下产生相同加速度时，物体的质量与所施外力的大小成正比。所以，他认为质量可以看做物体惯性的量度，这样定义的质量，称为惯性质量（m_I）。

牛顿认为，没有理由相信引力质量和惯性质量是同一个东西。但是，自由落体定律似乎告诉我们二者相等。自由落体运动是物体在万有引力作用下，依照牛顿第二定律所作的加速运动。万有引力定律可以写成

$$F = G\frac{Mm_g}{r^2} = m_g g \tag{3.1}$$

其中，r、M分别为地球的半径和引力质量，m_g为下落物体的引力质量，g为引力场强。牛顿第二定律是

$$F = m_I a \tag{3.2}$$

m_I为下落物体的惯性质量。二式联立可得

$$m_g g = m_I a \quad (3.3)$$

自由落体定律告诉我们。任何物体，不管其化学成分和重量，它们的下落加速度a都相同，都等于g，这就导致引力质量与惯性质量相等

$$m_g = m_I \quad (3.4)$$

不过，在牛顿时代这个实验相当粗糙，精度不高。于是，牛顿用单摆实验来做进一步的检测。单摆运动是摆球在重力和摆绳弹力共同作用下，按牛顿第二定律所作的运动。

单摆运动方程的一边是摆球所受的力，它依赖于摆球的引力质量m_g；方程的另一侧表示单摆在重力下的加速，它依赖于摆球的惯性质量m_I。这样算得的单摆公式为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_I l}{m_g g}} \quad (3.5)$$

如果这两个质量对于不同的物体有差异，m_I/m_g对各种物体不是同一个常数的话，单摆运动的周期，对不同物体就会有所不同。

但牛顿没有观测到这种不同。他在千分之一的精度范围内证明了引力质量等于惯性质量。所以，人们都把单摆周期公式写为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3.6)$$

爱因斯坦那个时代有个匈牙利物理学家Eötvös，中国人翻译成厄缶，他用扭摆实验在10^{-8}的精度之内没有查到引力质量和惯性质量的差异。相对论发表以后，迪克做到10^{-11}，俄罗斯的布拉金斯基做到10^{-12}，

都严格地证明了引力质量和惯性质量相等。在爱因斯坦那个时代，精度最高的是厄缶那个实验。爱因斯坦研究引力理论时知道这个实验。

爱因斯坦注意到：自由落体实验、牛顿的单摆实验和厄缶的扭摆实验都表明引力质量与惯性质量精确相等。他还想起了自己一直钦佩的物理学家兼哲学家马赫的见解：惯性力与万有引力相似，都起源于物体间的相互作用。

爱因斯坦终于认识到，“惯性”问题应该和“引力”问题合在一起解决，狭义相对论所遇到的两个困难实际上是同一个困难！

走向新理论的第三步：等效原理

这时，爱因斯坦不仅认识到引力与惯性力的相似性，而且认识到“引力质量与惯性质量相等”是经过严格实验检验的结论。经过反复思考后，他决定把这一结论往前推进一步，提出等效原理：惯性场与引力场局域等效。这就是说，在无穷小时空范围内，人们无法区分引力与惯性力。

爱因斯坦关于升降机（电梯）的思想实验（图3-3），最清楚地表达了他的等效原理思想。设想一个观测者处在一个封闭的升降机内，得不到升降机外部的任何信息。当他看到机内的一切物体都自由下落，下落加速度a与物体的大小及物质组成无关时（此时，他自己也感受到重力Ma，M是他自身的引力质量），他无法断定自己处在下列两种情况的哪一种：

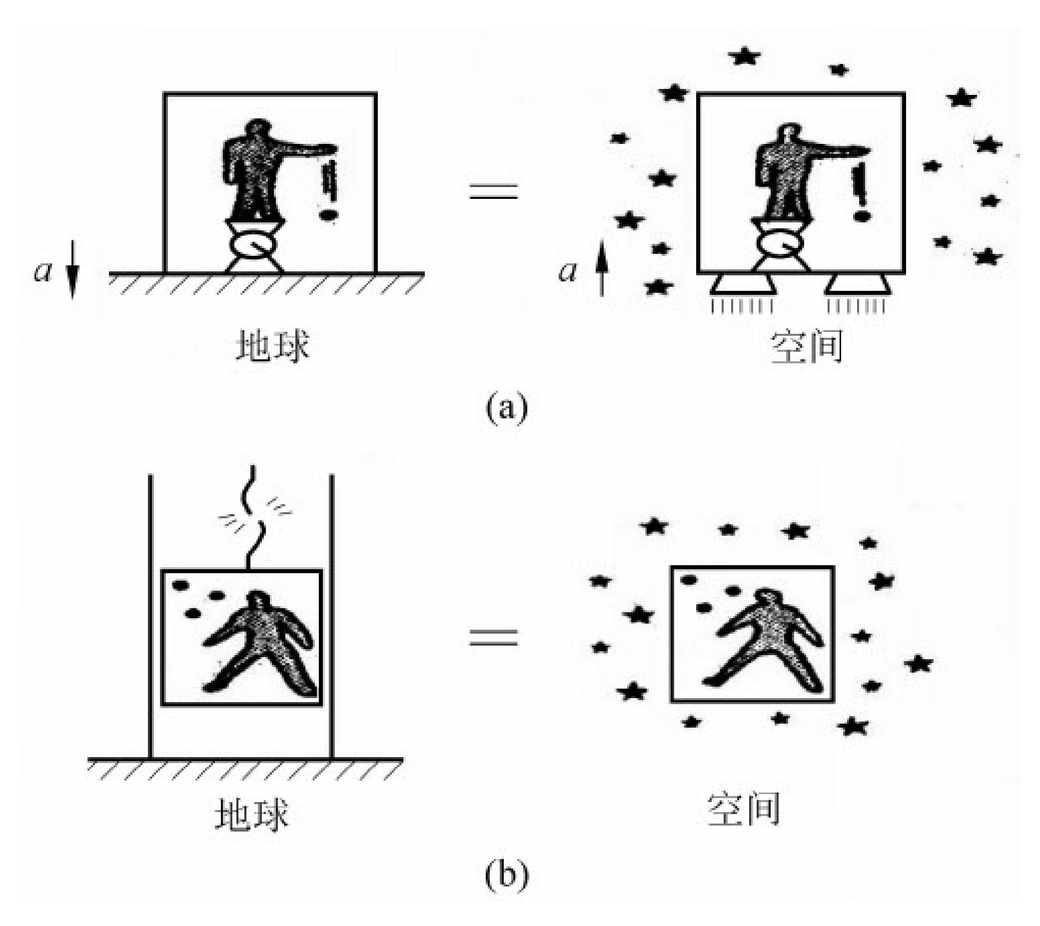


图3-3　爱因斯坦升降机

（a）引力与加速：左边表示升降机在星球（例如地球）表面静止，右边表示升降机在太空中加速；（b）自由下落与失重：左边表示升降机在星球引力场中自由下落，右边表示升降机在太空中作惯性运动

（1）升降机静止在一个引力场强为a的星球的表面。

（2）升降机在无引力场的太空中以加速度a运动。

当观测者感到自己和升降机内的一切物体都处于失重状态时，他同样无法断定自己处在下列两种情况的哪一种：

（1）升降机在引力场中自由下落。

（2）升降机在无引力的太空中作惯性运动。

造成上述现象的原因是，无法用任何物理实验来区分引力场和惯性场。即等效原理造成了上述不可区分性。

然而，引力场与惯性场还是有不同之处，它们在有限大小的时空范围内并不等效。例如，由于星球是球体，静置于星球表面的升降机，其内部的引力线有向星球中心汇聚的趋势，而在星际空间加速的升降机，其内部的惯性力线则是平行的。只要升降机不是无穷小，探测这些力线的灵敏仪器就可以区分这两种情况。

所以等效原理是一个局域性原理。也就是说，引力场与惯性场仅在无穷小时空范围内不可区分。

等效原理、马赫原理和广义相对性原理，形成了爱因斯坦新理论的物理基础。

惯性系的新定义

等效原理告诉我们，引力场中一个自由下落的、无自转的无穷小参考系，等价于在无引力场太空中作惯性运动的无穷小参考系。

如果我们把狭义相对论在其中成立的参考系定义为惯性系，那么，在无引力场太空中静止或作匀速直线运动的参考系和在引力场中自由下落且无自转的无穷小参考系，就都是惯性系（自转会引起惯性离心力和科里奥利力，从而偏离惯性系）。

然而，这两种惯性系实际上都不能严格实现，我们既不能使真实的参考系“无穷小”，又无法找到完全不存在引力场的太空区域，所以，在实际生活和科学实验中，只能找到近似的惯性系。

意大利物理学家费米是一位“多面手”，既能研究理论，又能搞实验。他的成就遍及统计物理、核物理、量子理论和广义相对论，还培养了6个得诺贝尔奖的学生。他曾经证明，一个无穷小的、无自转的自由下落参考系，可以在下落过程中，一直保持是一个惯性系。这种无穷小惯性系在时空中的运动，被称为费米移动。

猜想：引力是几何效应

等效原理还进一步告诉我们，当只有引力场与惯性场存在时，任何质点，不论质量大小，在时空中都会描出同样的曲线，自由落体实验已表明了这一点。再如，在真空中斜抛金球、铁球和木球，只要抛射的初速和倾角相同，这三个球都将在空间描出相同的轨迹。

这就是说，质点在纯引力和惯性力作用下的运动，与它的质量和成分无关。于是，爱因斯坦做出了物理思想上的又一个重大突破，他大胆猜测，引力效应可能是一种几何效应。万有引力不是一般的力，而是时空弯曲的表现。由于引力起源于质量，他认为时空弯曲起源于物质的存在和运动。

如何把时空几何与运动物质联系起来呢？爱因斯坦在建立新理论的过程中感到自己的数学知识欠缺，他需要新的数学工具。于是，他求助于自己的大学同学格罗斯曼。那时格罗斯曼已是大学的数学教授，他查阅了一批文献，然后告诉爱因斯坦，当时一些意大利人正在研究的黎曼几何和张量分析，也许对他有用。

奥林匹亚科学院

爱因斯坦早就对黎曼几何有一点定性的了解。他在专利局工作期间（1902—1905年），曾与几位热爱科学与哲学的好友组织了一个叫做“奥林匹亚科学院”的小组（图3-4）。

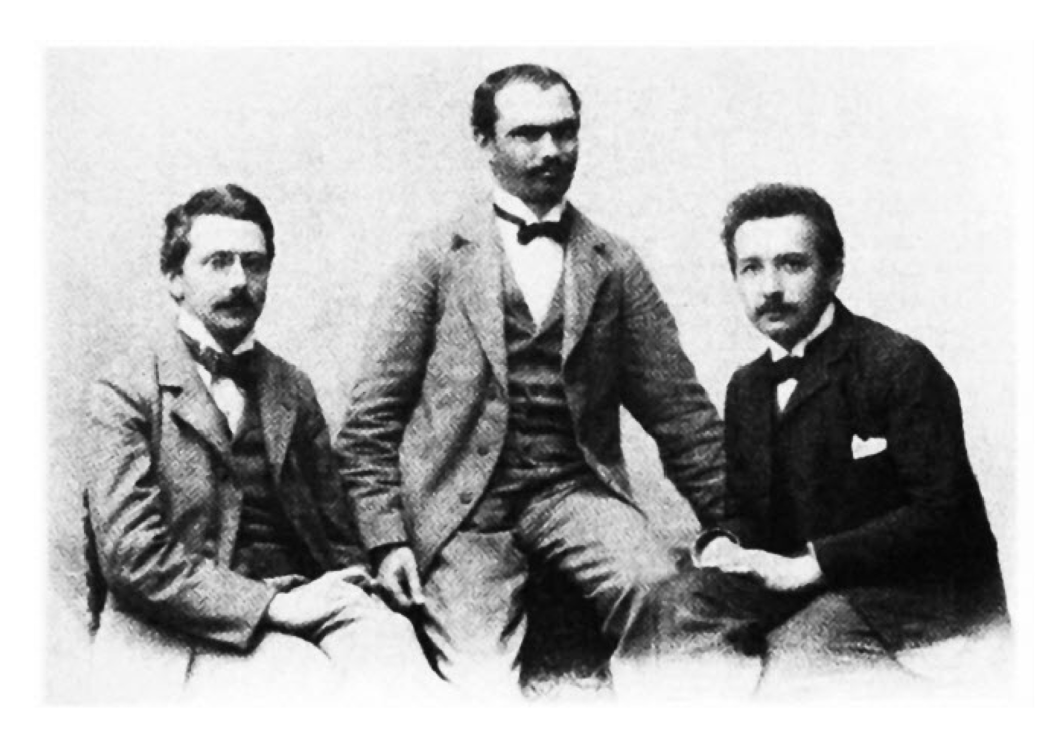


图3-4　爱因斯坦与奥林匹亚科学院中的朋友

与“奥林匹亚科学院”的哈比希特（左）和索洛文，约1902年

这是一个自由读书与自由探讨的俱乐部。小组的成员都具有大学文化水平，他们工作单位不同，专业背景也不同，有学物理的，有学哲学的，还有学工程技术的。这几个年轻人利用休息日或下班时间，一边阅读一边讨论，内容海阔天空，以哲学为主（特别是与物理有关的哲学），也包括物理、数学和文学。

他们充满热情地阅读、讨论了许多书籍，其中包括马赫的《力学史评》，这本书对牛顿的绝对时空观进行了猛烈的批判。马赫的见解深刻

地影响着年轻的爱因斯坦，他不惧权威的批判精神鼓舞着年轻的爱因斯坦。爱因斯坦曾多次强调，他提出狭义与广义相对论都与马赫的影响有关。

他们还阅读讨论了庞加莱的名著《科学与假设》，在此书中庞加莱简单提到过黎曼几何。这本书曾引起爱因斯坦和他的朋友们的极大兴趣。现在发现这本书中的内容居然有可能在自己的研究中派上用场，爱因斯坦十分高兴，于是他愉快地接受了格罗斯曼的忠告，开始关注和学习黎曼几何。

非欧几何的创立

下面我们简单介绍一下黎曼几何的建立。

欧氏几何，以它逻辑的严密，形式的完备和优美，两千年来为数学家和哲学家所倾倒。使人感到美中不足的是它的第五公设，即平行公理。此公理说，“过直线外的一点，可以引一条、并且只能引一条直线与原直线平行（不相交）”。

与其他公设比较，这个公设显得过长、过于复杂。人们自然希望第五公设能从其他公设推出，从而不再是一个公设。这方面的尝试开始于公元5世纪。一千多年中，许多杰出数学家为它绞尽脑汁，结果都一无所获。

无数前人的失败，终于使后人悟出了道理。第一个察觉其中奥妙的人大概是高斯。然而，由于欧氏几何在数学、哲学和神学中的神圣地位，高斯缺乏公开挑战的勇气，没有发表自己的观点。

最先提出并建立完整的新几何学的是俄国数学家罗巴切夫斯基（1792—1856年）。他是喀山大学的教授。他用“过直线外一点，可以引两条以上直线与原直线平行（不相交）”的新公设来取代第五公设。然而，他的理论在国内无人能懂，多次投稿均被拒绝，俄国彼得堡科学院甚至认为，“罗巴切夫斯基先生这方面的工作谬误连篇，今后不必理睬。”

罗巴切夫斯基只好把论文发表在喀山大学的学报上，外界几乎无人知晓。后来他出国演讲，宣传自己的新几何，但还是遭到冷遇。唯一听懂了他的理论的高斯，未敢公开表示赞同。高斯在日记和给友人的信中

写到，会场上，自己大概是唯一听懂了罗巴切夫斯基工作的人。

应该说明，高斯虽然未对新几何表态，却高度评价了罗巴切夫斯基的其他工作。经高斯提名，德国科学院授予罗巴切夫斯基通讯院士的光荣称号。然而，罗巴切夫斯基最杰出的工作，却长期得不到承认。他晚年双目失明，处境凄凉，但仍在学生的协助下，顽强地通过口述完成了自己的工作，并在逝世前，终于得到世界的认可。罗巴切夫斯基的新几何，被称为罗氏几何。

比罗巴切夫斯基稍晚一点，年轻的匈牙利数学家鲍耶（1802—1860年）也独立地研究了这个问题，并提出了与罗氏一样的新几何构想。鲍耶采用了反证法，企图从“第五公设不成立”引出谬误。他假设过直线外的一点可以引两条以上的平行线，试图推出谬误。然而他在反证的路上越走越远，却始终不见“谬误”的影子。鲍耶的思想突然产生了飞跃，认识到可以引入不同于第五公设的其他公理，例如把“过直线外一点可以引两条以上的平行线”作为公理，取代“第五公设”建立新的几何学。

鲍耶的父亲是高斯的同学，他把儿子的工作告诉高斯，征求他的意见。高斯回信说：我实在无法赞扬你的儿子，因为赞扬他就等于赞扬我自己，我早就得到过与他相同的结果。

鲍耶误解了高斯对他工作的评价，以为高斯要借其所处的地位来窃取他的成果，于是愤而终止了自己的研究。幸亏鲍耶的父亲把儿子的研究成果作为附录，收在自己的一本书中出版，否则，鲍耶的成就将无人知晓。

德国数学家黎曼用另一个公设来代替欧几里得的第五公设。他提出，“过直线外一点的任何直线都必定与原直线相交”，也就是说，一条

平行线也做不出来。他所建立的几何称为黎氏几何。

实际上，欧氏几何、罗氏几何、黎氏几何描述的是不同曲率的空间（图3-5）。欧氏几何描述零曲率空间（如平面），黎氏几何描述正曲率空间（如球面），罗氏几何描述负曲率空间（如伪球面、马鞍面）。弯曲空间中没有直线。罗巴切夫斯基等人谈论的直线实际是“短程线”，即两点之间的最短线，例如球面上的大圆周。平直空间中的短程线就是直线，短程线可以看作直线在弯曲空间的推广。罗巴切夫斯基等人所说的平行直线，实际上是“不相交的短程线”。

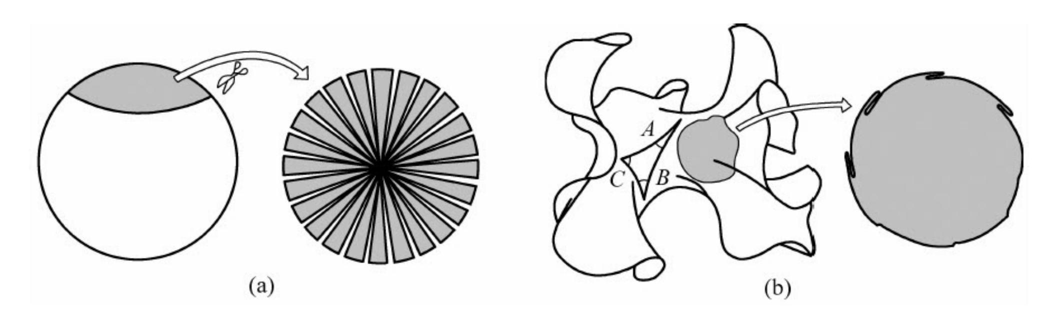


图3-5　正负曲率的二维空间

罗氏几何和黎氏几何，统称非欧几何。黎曼又把欧氏几何与非欧几何合在一起，成为黎曼几何。

黎曼几何简介

下面我们以球面上的几何为例，来解释一下黎曼几何。球面上没有直线，但有短程线，球面上的短程线就是“大圆周”。我们过球面上的两点和球心，做一个平面，此平面在球面上截出的曲线就是大圆周。例如，赤道和地球上所有的经线都是大圆周，但除赤道以外的所有纬线都不是大圆周，不是短程线。

例如，我们坐飞机由北京直飞纽约的航线，从北京起飞后飞机不是向正东飞，而是向东北方向飞，经过我国的东北，俄罗斯的远东地区，飞到白令海峡附近，然后沿阿拉斯加的北海岸向东，再转向东南，穿越加拿大的大片地区，最后飞抵纽约。

有人或许会问：“干嘛要绕大圈呢？从北京直接往东飞不是近一点吗？”不对，因为从北京直接向东飞往纽约的航线不是最短的，不是短程线。短程线是过北京、纽约和地心三点的平面，截地球表面得到的线，那正是现在北京直飞纽约的航线。所以飞机恰好是沿短程线飞行的。

平面几何中“过直线外的一点能引一条平行线”，在球面情况就是过大圆周外一点，能否再画一个大圆周和自己不相交？答案是“不能”。你想，过赤道外一点，能画出另一大圆周并使它与赤道不相交吗？肯定不能！所以球面上不存在“平行线”。

平面上的三角形是由三条直线围成的，球面上的三角形也应该由三条短程线（大圆周）围成。大家看图3-6，上面标出了赤道和两条经线围成的三角形。由于所有的经线都与赤道垂直，所以此三角形二底角之

和已是180°，再加上顶角，三角形三内角之和肯定大于180°了。

下表列出了三种几何的特点。

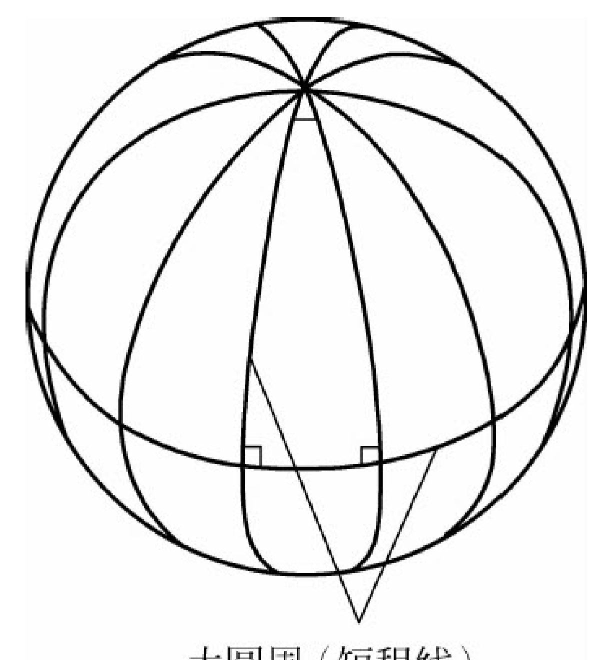


图3-6　球面上的短程线和三角形

	空间曲率	平行线	三角形三内角之和	圆周率	例
欧氏几何	零	一条	＝180°	＝π	平面
黎氏几何	正	无	＞180°	＜π	球面
罗氏几何	负	两条以上	＜180°	＞π	伪球面、马鞍面

1845年，黎曼从更高的角度把这三种几何统一起来，成为黎曼几何，用来描述弯曲和扭曲的几何客体。黎曼曾用这一工作，在哥廷根大学做了申请一个讲师职位的求职报告。

黎曼天才地预见到，真实的空间不一定是平直的。如果不平直，就不能用欧氏几何来描述，而要用黎曼几何来描述。他还预见，物质的存在可能造成空间的弯曲。

黎曼几何为爱因斯坦建立他的广义相对论，准备了数学基础。

探究弯曲的时空

这时，爱因斯坦产生了与当年黎曼类似的猜想。而且，此时的爱因斯坦已经掌握了大量的物理知识，创建新理论的条件已经成熟，这些都是当年黎曼不可能具备的。

起初爱因斯坦与格罗斯曼合作，学习和掌握黎曼几何，并寻找联系物质和时空几何的基本方程——场方程。他们尝试写出了一些形式的方程，但都有重大缺陷。爱因斯坦到德国后，又与希尔伯特探讨。希尔伯特不愧是一位数学大师，爱因斯坦与他作了短时间的探讨，几个月后爱因斯坦就给出了场方程（广义相对论的核心方程）的正确形式，建立起他的新理论——广义相对论。

新理论克服了旧理论的两个基本困难，用广义相对性原理代替了狭义相对性原理，并且包容了万有引力。爱因斯坦认为，新理论是原有相对论的推广，因此称其为广义相对论，而把原有的相对论称为狭义相对论。

应该指出，希尔伯特在与爱因斯坦讨论后不久，也几乎同时得到了类似的场方程。但希尔伯特只是在数学形式上得到了这个方程，并不了解它的深刻物理内容，而且，他对所得到的场方程的物理解释并不完全正确。

爱因斯坦与希尔伯特在1915年底形成了竞争。爱因斯坦关于广义相对论的论文是11月25日完成并投稿的，于12月5日发表，文中给出了正确的场方程。希尔伯特的有关论文是11月20日完成并投稿，1916年3月1日刊出的。希尔伯特的论文投稿时间比爱因斯坦早5天，但稿中没有给

出正确的场方程。他在修改清样期间，看到了爱因斯坦的论文，就在自己的论文中补入了正确的广义相对论场方程。此外，希尔伯特投稿前曾有一封给爱因斯坦的信，祝贺他算出了水星轨道近日点进动的正确值。

可见，爱因斯坦得到广义相对论场方程比希尔伯特要早。不过场方程的数学形式十分复杂，如果没有希尔伯特的帮助，恐怕爱因斯坦很难在1915年底找到场方程的正确形式，并完成这一理论。

希尔伯特曾在给爱因斯坦的信中谈到“我们的理论”，爱因斯坦对此很不高兴，回信说“这是我的理论，什么时候成了‘我们的理论’了？……”希尔伯特后来也承认爱因斯坦是广义相对论的唯一创建人。这个不愉快的小插曲没有影响两人后来的友谊。

走向广义相对论

实际上广义相对论的建立是一个漫长的过程。最初，爱因斯坦企图把万有引力纳入狭义相对论的框架，几经失败使他认识到此路不通，反复思考后，他产生了等效原理的思想。

爱因斯坦曾回忆这一思想产生的关键时刻：“有一天，突破口突然找到了。当时我正坐在伯尔尼专利局办公室里，脑子忽然闪现了一个念头，如果一个人正在自由下落，他绝不会感到自己有重量。我吃了一惊，这个简单的思想实验给我的印象太深了。它把我引向了引力理论。……”

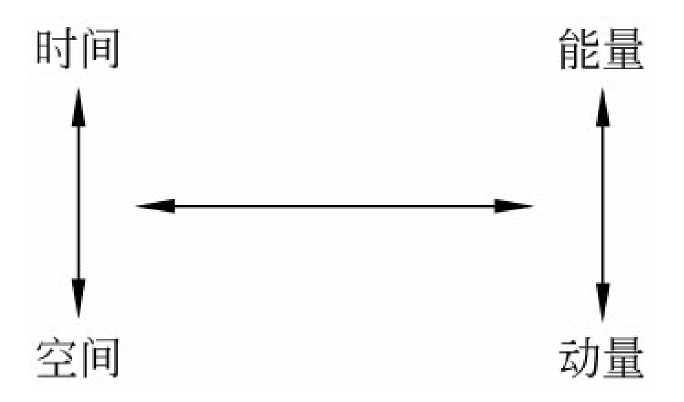
爱因斯坦1905年开始研究万有引力，1907年提出等效原理，1911年得到光线在引力场中弯曲的结论，1913年与格罗斯曼一起把黎曼几何引进引力研究，1915年与希尔伯特讨论，并在当年找到了场方程的正确形式。除去在数学上曾得到希尔伯特和格罗斯曼的有限、然而十分可贵的帮助之外，爱因斯坦几乎单枪匹马奋斗了10年，才把广义相对论的框架大体建立起来。

1905年发表狭义相对论时，有关的条件已经成熟，洛伦兹、庞加莱等一些人，都已接近狭义相对论的发现。

而1915年发表广义相对论时，爱因斯坦则远远超前于那个时代所有的科学家，除他之外，没有任何人接近广义相对论的发现。所以爱因斯坦自豪地说：“狭义相对论如果我不发现，5年之内肯定会有人发现；广义相对论如果我不发现，50年之内也不会有人发现。”

物质告诉时空如何弯曲

广义相对论，实际上是一个关于时间、空间和引力的理论。狭义相对论认为时间、空间是一个整体（四维时空），能量、动量是一个整体（四维动量），但没有指出时间-空间与能量-动量之间的关系。广义相对论进一步指出了这一关系，认为能量-动量的存在（也就是物质的存在），会使四维时空发生弯曲！万有引力并不是真正的力，而是时空弯曲的表现！如果物质消失，时空就回到平直状态。



爱因斯坦给出了广义相对论的基本方程，这个方程被称为爱因斯坦场方程，

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \kappa T_{\mu\nu} \qquad (3.7)$$

式中常数κ与万有引力常数G有关

$$\kappa = \frac{8\pi G}{c^4}$$

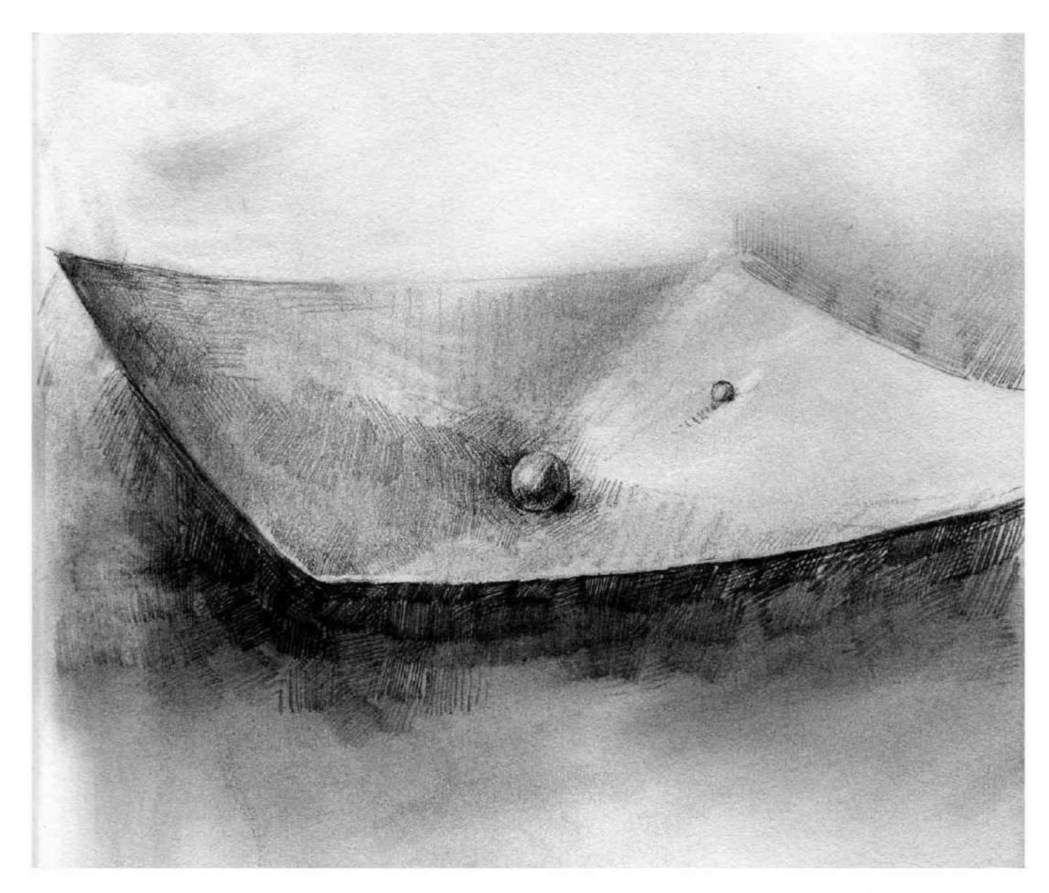
其中c是光速。爱因斯坦场方程是张量方程，式中带有下角标字母的$R_{\mu\nu}$、$T_{\mu\nu}$、$g_{\mu\nu}$以及R都是张量。

爱因斯坦之所以采用张量来表述广义相对论，是因为张量方程在坐标变换下形式不变，他认为这符合自己的广义相对性原理：物理规律不依赖于坐标系的选择。我们不想在此处做过于专门的讨论，感兴趣的读者可参看任何一本介绍广义相对论的书籍。

用爱因斯坦场方程，可以精确地算出，能量-动量的存在，如何影响时空的弯曲。该方程左端是描述时空曲率的量，右端是描述能量-动量的量：

时空曲率＝能量动量

实际上，这是由10个二阶非线性偏微分方程组成的方程组，非常难解。



绘画：张京

时空告诉物质如何运动

相对论把四维时空中的曲线称为世界线。广义相对论认为，万有引力不是一般的力，而是时空弯曲（图3-7）造成的几何效应。质点在万有引力作用下的运动（例如地球上的自由落体；行星的绕日运动等），没有受到力，是弯曲时空中的自由运动——惯性运动。它们在时空中描出的世界线，虽然不是直线，却是直线在弯曲时空中的推广——“测地线”。粗略地说，测地线就是短程线，即两点之间的最短线或最长线（注意，相对论中把最短线和最长线都称为短程线）。当时空恢复平直时，测地线就成为通常的直线。

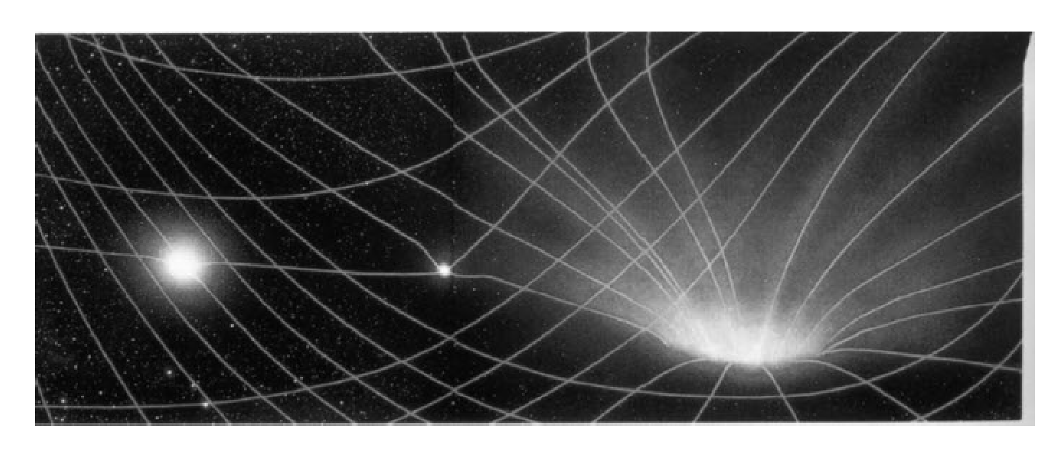


图3-7　弯曲的时空示意图

需要说明的是，在通常的平直空间或正曲率空间中，两点之间存在最短线。但在相对论的四维时空中，两点之间有的有最短线，有的却没有最短线，只有最长线。例如自由质点描出的测地线，实际上是两点间最长的世界线，而不是最短线。

双生子佯谬问题中留在地球上的人近似处于惯性运动状态，它描出的世界线就是测地线，是两点间的最长线。也就是说，在两个确定的时空点之间运动的一群人，其中处于惯性运动状态的那个人描出的世界线

最长。由于世界线的长度就是他经历的真实时间，所以他经历的时间也就最长。星际旅行者经历加速过程，他的世界线不是测地线，所以他会比留在地球上的同胞兄弟年轻。

爱因斯坦采用数学家们已经得到的测地线方程，作为决定弯曲时空中自由质点如何运动的“运动方程”

$$\frac{d^2x^\alpha}{ds^2}+\Gamma^\alpha_{\mu\nu}\frac{dx^\mu}{ds}\frac{dx^\nu}{ds}=0 \qquad (3.8)$$

方程中s是测地线的弧长，$\Gamma^\alpha_{\mu\nu}$称为“联络”，-描述引力场强或惯性场强。

场方程表示“物质告诉时空如何弯曲”，运动方程则表示“时空告诉物质如何运动”。

爱因斯坦初建广义相对论时，认为广义相对论的基本方程有两个：场方程（3.7）和运动方程（3.8）。后来，爱因斯坦和苏联的福克分别证明，从场方程可以推出运动方程，因此，广义相对论的基本方程只有一个——场方程（3.7）。

另外，在他们的证明中还得到一个值得注意的副产品：场方程中作为场源的质量，在推出的运动方程中，同时出现在惯性质量和引力质量两个位置上。这告诉我们，在广义相对论的理论框架中，引力质量和惯性质量是同一个东西。

如何理解时空弯曲

我们打个比方来较为形象地说明时空弯曲。假如四个人各拉紧床单的一个角，床单这个二维空间就是平的。放一个小玻璃球在上面，如果不去推它，它就会保持静止或匀速直线运动状态不变（假设床单足够光滑，床单的微小摩擦力可以忽略）。如果床单中央放一个铅球，床单就会凹下去，这个二维空间就弯曲了。这时，如果再放置一个小玻璃球在床单上，它就会滚向中央的大球。

在这个例子中，可以把大球看做“地球”，小球看做一个下落的物体。小球为什么会滚向大球呢？按照牛顿的观点，这是由于大球（地球）用“万有引力”吸引小球。按照爱因斯坦的观点，则是由于大球（地球）的存在使空间弯了，并不存在什么“引力”，小球落向大球乃是弯曲空间中的自由（惯性）运动。

如果给小球一个横向速度，它就会绕大球转起来。这时可把大球看作太阳，小球比作行星。为什么小球（行星）不远离大球（太阳）飞向远方呢？按照牛顿的观点，这是由于小球受到大球的“引力”，不能跑向远方，只能环绕大球运动。按照爱因斯坦的观点，小球并未受到任何力，只是由于空间弯曲了，在弯曲空间中它作自由（惯性）运动不能飞向远方。

对上述比喻应该加以解释的是，上面例子所说的只是“空间”弯曲，而广义相对论说的则是四维“时空”的弯曲。太阳的存在使四维时空弯曲了，行星绕日运动，就是在弯曲时空中的惯性运动，行星描出的世界线是四维时空中的测地线，根本就不存在什么万有引力。

注意，这里所说的测地线不是指行星在三维空间中的椭圆轨道，而是指图3-8中所示的行星在四维时空中描出的螺旋状世界线。图3-8是在相对于太阳静止的参考系中绘出的时空图。太阳描出的世界线是一条与时间轴平行的直线，而行星绕日运动的世界线则是一条螺旋线。

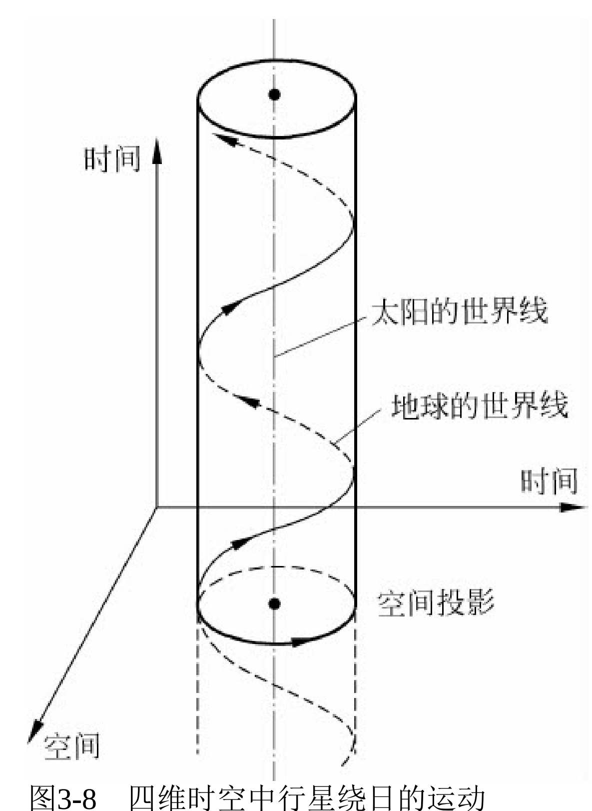


图3-8　四维时空中行星绕日的运动

广义相对论的实验验证

爱因斯坦发表广义相对论的时候，求出了场方程的一些近似解。他在发表自己理论的时候，同时提出了三个检验广义相对论的实验：（1）引力红移；（2）行星轨道近日点的进动；（3）光线偏折。这3个实验均被观测证实。除去这3个验证实验外，还有1970年前后所做的雷达回波延缓实验，以及1978年发现的脉冲双星运转周期减小，从而间接证实引力波存在的实验。

引力红移

按照广义相对论，时空弯曲的地方，钟走得慢，即时间会变慢。时空弯曲得越厉害，钟走得越慢，所以，太阳附近的钟，会比地球上的钟走得慢。但是我们不可能在太阳表面放一个钟，即使放一个钟也不敢用望远镜去看，太阳光实在太强了。不过没有关系，太阳表面原本就有钟。

我们知道，每种元素都有特定的光谱线。一根频率为v的光谱线，表示原子内部有一个以频率v走动的钟。太阳表面有大量氢原子，因此可以比较太阳附近氢原子发射的光谱线和地球实验室中的氢光谱线来进行检验。由于太阳附近的钟变慢，那里射过来的氢原子光谱线（与地球上的氢光谱比较）频率会减小，即谱线会向红端移动。这就是广义相对论预言的引力红移，它反映太阳表面的钟变慢。后来的观测实验证实了这一预言。

此后，人们又检验了银河系中其他一些恒星的引力红移。白矮星等高密度恒星的引力红移远比太阳强，但这些恒星离我们太远，观测精度较低。后来，人们又利用穆斯堡尔效应在地面上检验了引力红移。上述检验的结果均与广义相对论的预言一致。

近年来的研究表明，宇宙学红移（即天文观测发现的河外星系远离我们造成的红移现象）不属于多普勒效应，也属于引力红移。

行星轨道近日点的进动

爱因斯坦谈到的第二个检验广义相对论的实验是：行星轨道近日点的进动。

牛顿的万有引力定律算出，行星的轨道是一个封闭的椭圆，正好与开普勒定律相符。然而，实际观测表明，行星轨道不是一个封闭的椭圆，轨道的近日点不断向前移动（进动），如图3-9所示。这个效应以离太阳最近的水星最为显著，每百年高达5600弧秒，这种效应主要可归因于天文学上的岁差，以及其他行星对水星运动的影响。扣除这些影响后，尚有约43弧秒/百年的进动无法解释。

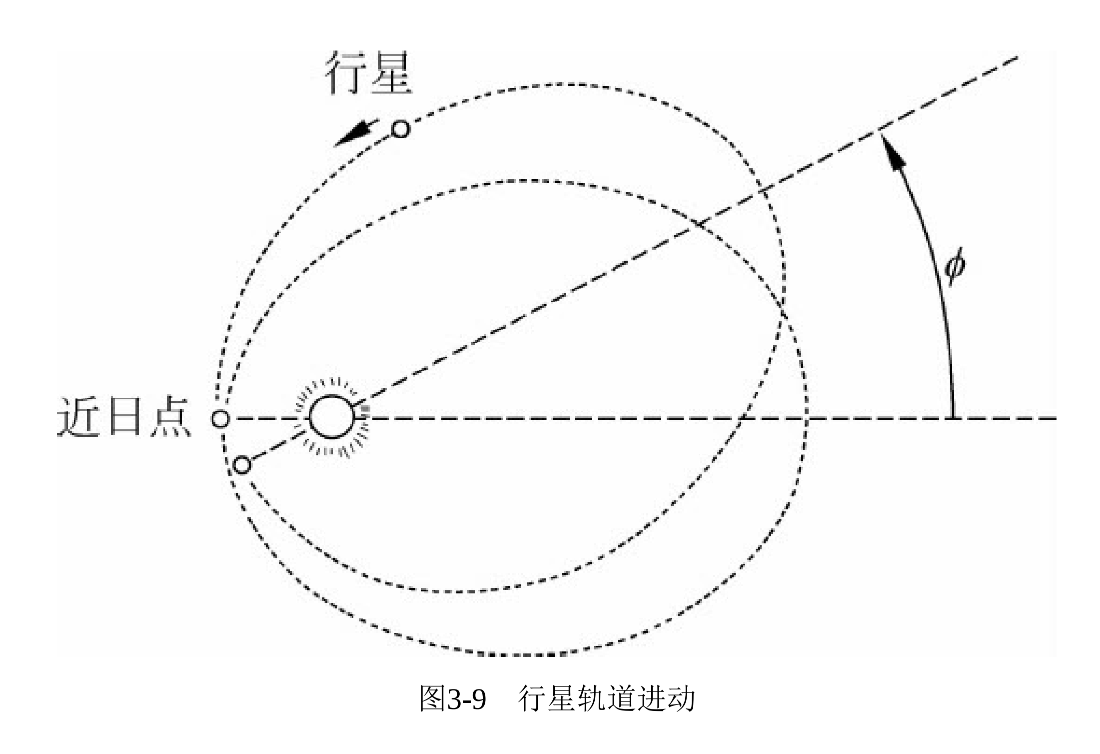


图3-9　行星轨道进动

按照广义相对论，行星绕日的轨道不再是封闭的椭圆，轨道的近日点会不断向前移动。

当时许多人怀疑存在一颗比水星离太阳更近的未知行星，而水星轨道的剩余进动就来源于这颗星的影响。法国天文学家勒维叶在预言海王

星成功之后，曾通过水星轨道的这一偏差来反推出这颗离太阳极近的未知行星的轨道。曾有一度，人们把太阳盘面上移动的一个黑点误认为是这颗未知的行星，由于它离太阳这个火球非常近，给它起名为火神星。然而不久就发现那不过是太阳表面的一个黑子，所谓的火神星纯属子虚乌有。此后，水星轨道近日点每百年43弧秒的进动一直是个未解之谜。

广义相对论算出的行星轨道，本身就不是一个封闭的椭圆，不需其他行星影响，自己就会“进动”。而且，对于水星轨道，这个进动值恰恰就是每百年43弧秒。这样，实验观测支持了广义相对论。而且，这一实验是所有验证广义相对论的实验中精度最高的。

爱因斯坦在完成广义相对论之前，就知道水星轨道这43弧秒的进动值一直没有得到解释。当他用广义相对论算出这一进动值时，高兴极了，他在给洛伦兹的信中说：“我现在正为历尽艰辛获得的理论的清晰，以及它与水星轨道近日点进动的一致而感到快乐。”他在给其他友人的信中说：“（在发现自己的理论与水星轨道进动值密切相符后）我简直高兴极了，一连几个星期我都高兴得不知怎么样才好。……”这毫不奇怪，因为物理学（其他自然科学也一样）是一门实验与测量的科学，只有能够被实验和测量严格定量证实的理论才能进入物理学。

爱因斯坦认识到，广义相对论与水星轨道运动的这种高度一致性，表明自己已经找到了正确的引力场方程，自己的理论已经成功了。

太阳附近的光线偏折

爱因斯坦检验广义相对论的第三个观测实验是光线偏折。由于太阳造成时空弯曲，遥远恒星的光通过太阳附近时会发生偏折，弯向太阳（图3-10）。虽然从牛顿的万有引力定律也可得出光线偏折的结论，但其偏转角只有广义相对论预言值的一半。

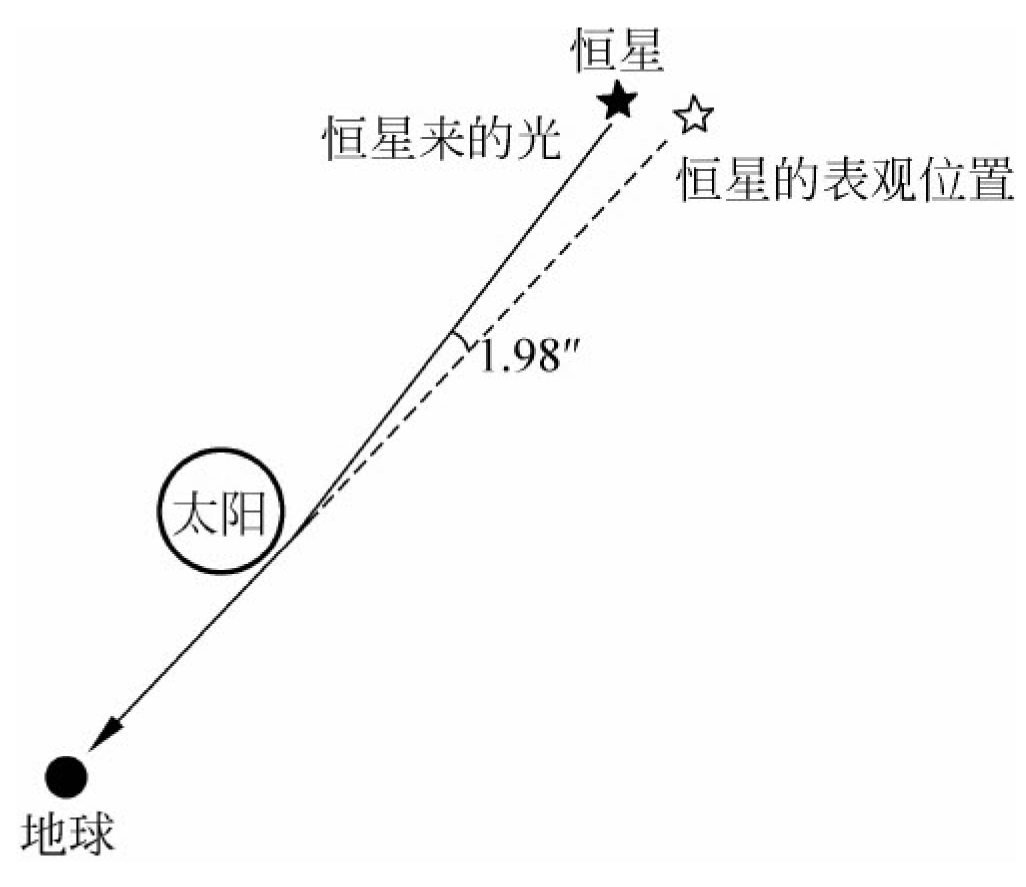


图3-10　光线偏折

这一观测很难进行，需要拍下太阳背后的星空，来与太阳不存在时的同一星空照片比较，观察并测量恒星位置的偏离。太阳比恒星亮得多，白天根本不可能拍下太阳背后的星空。唯一的可能是在发生日全食的时候进行拍摄。当月亮的影子完全挡住太阳，太阳背后的恒星在黑暗中显现的时候，抓紧拍下照片。不存在太阳的同一星空背景，则需在几

个月前或几个月后拍摄。

平常我们看到太阳每天从东方升起到西方下落一次，这叫太阳的周日运动（地球自转引起）。此外，太阳还有一个周年运动（地球公转引起），即每天的同一时刻，太阳在星空背景上的位置都不同，都要移动差不多一度，全年正好移动一圈。所以，白天出现在太阳背后的星空，几个月前或几个月后，会在夜间出现。

英国的爱丁顿在1919年日全食的时候，首次进行了检验光线偏折的观测。两支观测队分别到达将出现日全食的不同地点，南美洲的巴西和非洲西岸的普林西比。

爱丁顿亲自率领的一队，在普林西比碰上阴天，幸运的是在日全食即将结束之前，一阵风吹开了乌云。他们在6～8分钟的日全食时间内，拍了15张照片。

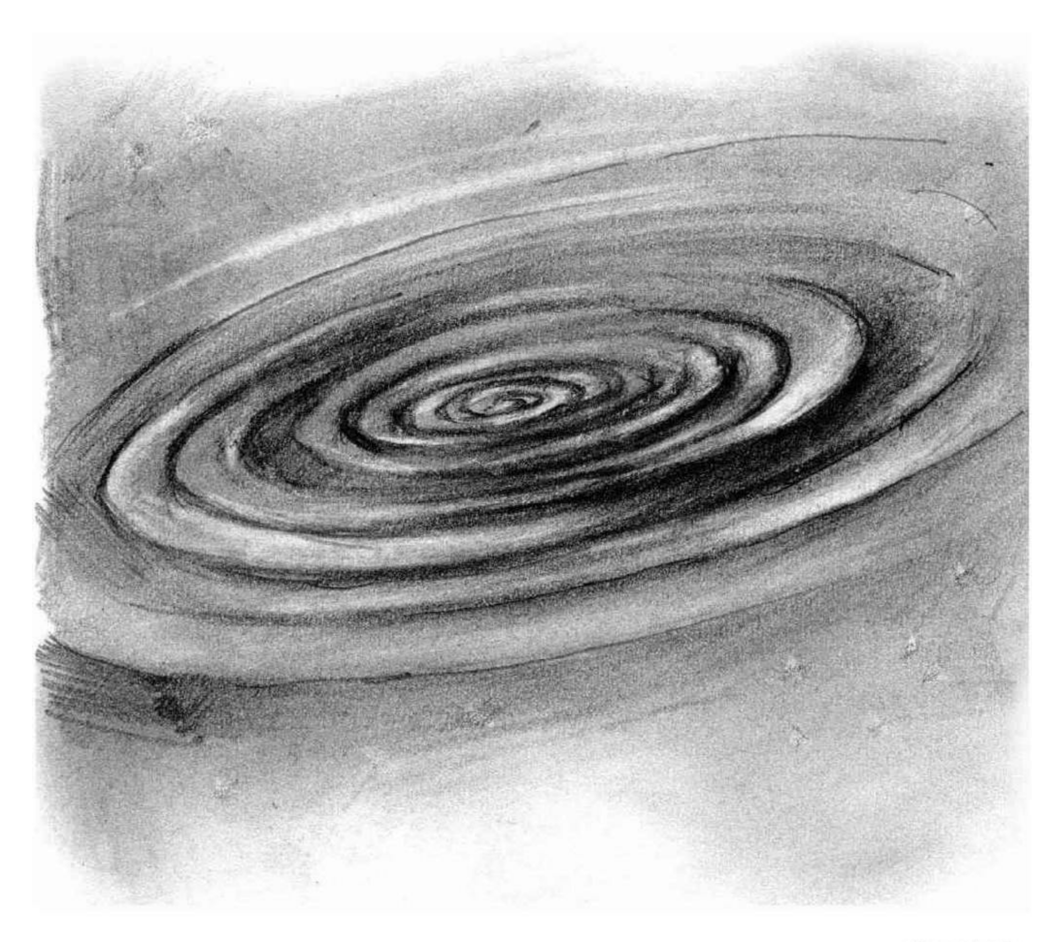
去巴西的那一队遇到艳阳天，比较顺利地拍摄了照片。但后来发现，由于仪器过热造成了胶片形变，幸亏经过修正后，数据依然可用。几个月后太阳移开了这一星空区，他们又拍了这一星空区的照片。

从照片上比较，光线确实偏折了，两队观测数据显示的偏转角分别为1.61秒和1.98秒，接近广义相对论预言的1.75秒，而比牛顿万有引力定律预言的0.88秒大一倍左右。观测支持了广义相对论。

消息传到德国时，有人问爱因斯坦有什么感想，他平静而自信地说："我从来没有想过会是别的结果。"光线偏折实验是对广义相对论的有力支持。

严格而美妙的数学物理体系，高深难懂的黎曼几何和张量分析，精

密神奇的实验验证，再加上爱因斯坦发表狭义相对论和光子说的巨大影响，使广义相对论一下就得到了科学界的承认，爱因斯坦的威望也达到了一生中的顶峰。



绘画：张京

第四章　奇妙的黑洞

我们现在从广义相对论的角度来描述黑洞，也就是说，介绍一下弯曲时空中的黑洞。这需要一点数学知识。事实上用一点数学，比完全不用数学，能使普通读者更容易、更清楚也更正确地了解黑洞。具备一点点最初步的高等数学知识的读者，就可以读懂下面的讨论。

四维时空

我们先介绍一下四维时空的概念。爱因斯坦的狭义相对论发表之后，他大学时代的数学老师闵可夫斯基发现，如果把三维空间和一维时间看成一个整体的四维时空，就可以把爱因斯坦的狭义相对论写成更清楚、更简洁的形式。

大家知道，在笛卡儿的直角坐标下，三维空间中两点之间的距离dl可以写成

$$\mathrm{d}l^2 = \mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2 \tag{4.1}$$

如果换成球坐标表述，则可写成

$$\mathrm{d}l^2 = \mathrm{d}r^2 + r^2\mathrm{d}\theta^2 + r^2\sin^2\theta\mathrm{d}\varphi^2 \tag{4.2}$$

闵可夫斯基把时间看做第四维空间，把四维时空中两点之间的距离（在相对论中称为间隔）ds写成

$$\mathrm{d}s^2 = -c^2\mathrm{d}t^2 + \mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2 \tag{4.3}$$

这是直角坐标系下的表达式，如果换用球坐标，则应写为

$$\mathrm{d}s^2 = -c^2\mathrm{d}t^2 + \mathrm{d}r^2 + r^2\mathrm{d}\theta^2 + r^2\sin^2\theta\mathrm{d}\varphi^2 \tag{4.4}$$

注意，时间项的前面与3个空间项的前面差一个负号，这是“光速不变”原理决定的。在此我们就不详细介绍了，感兴趣的读者可参看介绍相对论的书籍。

式（4.3）与式（4.4）表达的四维时空，称为闵可夫斯基时空。它

不属于欧几里得空间，而属于伪欧几里得空间，关键就在于时间项与空间项前面的符号有正有负。

应该说明，上面4个式子虽然有的是直角坐标有的是球坐标，但都表示的是平直时空，采用球坐标并不表示时空一定弯曲。

闵可夫斯基小时候是个神童，他与数学家希尔伯特是同学。他聪明到什么程度呢？聪明到让小希尔伯特对自己都缺乏信心了，觉得自己大概不行，闵可夫斯基兄弟几人才是真正的聪明人。长大后，希尔伯特成为数学大师，闵可夫斯基的成就却不算大。

这次，闵可夫斯基抓住自己学生爱因斯坦的相对论，作出了一个重要贡献。他创建的四维闵可夫斯基时空，为爱因斯坦后来把自己的相对论，发展成广义相对论铺下了第一块数学基石。爱因斯坦在刚刚看到闵可夫斯基的这一工作时，开玩笑说：你这么一搞，我都看不懂自己的相对论了。

世界线

四维闵可夫斯基时空中的一个点，用（t，x，y，z）四个坐标表示，称为一个事件。三维空间中的一个点，不管是运动的点还是不动的点，由于时间的不停发展，在四维时空中都会描出一根线，称为世界线。

图4-1中A、B、C三条世界线，A描述三维空间中的一个不动点，B描述一个匀速直线运动的点，C描述一个变速运动的点。ds为世界线上两点之间的“距离”。注意，由于不可能在图上画出时空的全部四个维度，我们没有画出z坐标描述的那一维空间。

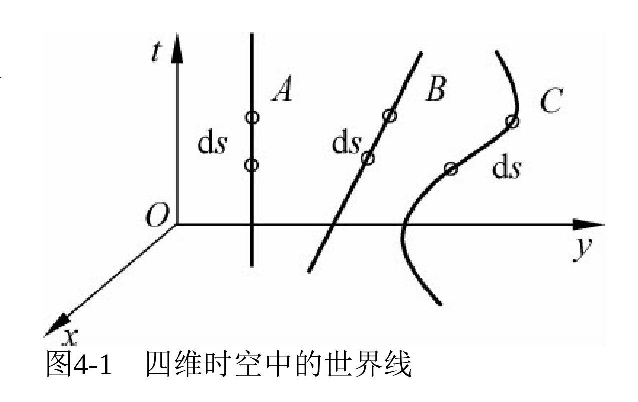


图4-1　四维时空中的世界线

ds通常称为两点的间隔。由于两点之间总可以用世界线相连，所以ds又可看作世界线的线元。从式（4.3）不难看出，当ds^2＝0时，有

$$v^2 \qquad \frac{\mathrm{d}x^2+\mathrm{d}y^2+\mathrm{d}z^2}{\mathrm{d}t^2}=c^2$$

这表明从点1（事件1）到点2（事件2）的运动速度正好是光速，这段间隔ds恰好描述光信号的运动。我们称此间隔为类光间隔。我们称描述亚光速信号（$v^2 < c^2$）的间隔为类时间隔；描述超光速信号（$v^2 > c^2$）的间隔为类空间隔。从式（4.3）不难看出

$$\mathrm{d}s^2 > 0 \quad v^2 > c^2 \qquad \text{间隔类空}$$

$$\mathrm{d}s^2 = 0 \Leftrightarrow v^2 = c^2 \qquad \text{间隔类光}$$

$$\mathrm{d}s^2 < 0 \quad v^2 < c^2 \qquad \text{间隔类时}$$

光锥

时空中任选一点P，与P点的间隔类光的点组成如图4-2所示的锥面，称为P点的光锥。光锥实际上是四维时空中的一个三维超曲面，我们略去了一维空间。

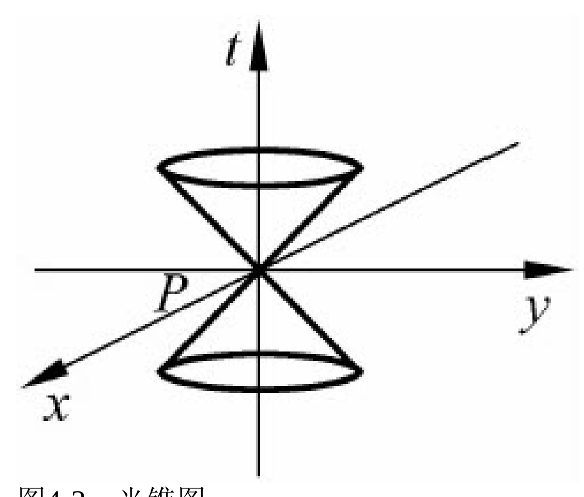


图4-2　光锥图

光锥内部的点与P点的间隔都是类时的，与P点以亚光速信号相联系。上半光锥内部的点，处在P点的未来，从P点出发的亚光速信号或质点可以到达它们。下半光锥内部的点处在P点的过去，从那里出发的亚光速信号或质点可以抵达P点。

上半光锥面上的点也处在P点的未来，从P点出发的光信号可以抵达它们。下半光锥面上的点处在P点的过去，从那里出发的光信号可以抵达P点。

光锥外部的点与P点的间隔类空，只有超光速信号或质点才能抵达它们，或从它们抵达P点。相对论认为光速是信号的最大传播速度，不存在超光速的信号传播和物体运动。所以，光锥外部的点与P点没有因果联系。

总之，只有光锥面上和光锥内部的点与P点有因果关系。下半光锥（内部及面上）的所有点，都处在P点的因果过去，都可以对P点的事件产生影响。上半光锥（内部及面上）的所有点，都处在P点的因果未来，P点的事件都可以影响它们。

P点的一个矢量如果落在光锥内部，称其为类时矢量；如果落在光锥外部，称其为类空矢量；如果恰好落在光锥面上，则称其为类光矢量（图4-3）。

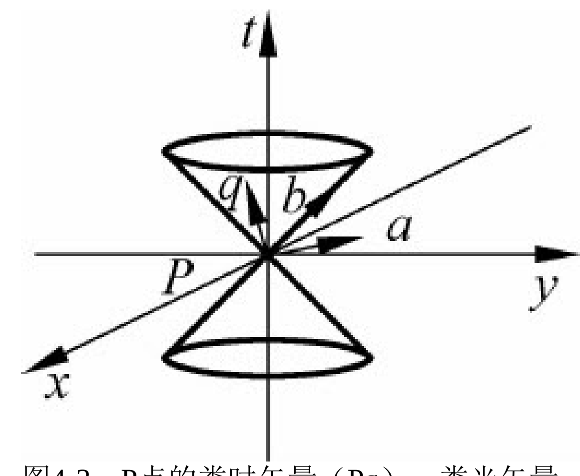


图4-3　P点的类时矢量（Pq）、类光矢量（Pb）和类空矢量（Pa）

一条世界线，如果线上每一点的切矢量都类时，称其为类时世界线，简称类时线。如果每一点的切矢量都类空，称其为类空线；如果每一点的切矢量都类光，称其为类光线。

显然，过P点的类时线都在光锥内部，类光线都在光锥面上，类空线都在光锥面外。

球对称的弯曲时空

爱因斯坦发表广义相对论时，自己并没有得到场方程的严格解，他是用近似解算出三大实验验证的结果的。

不过，他1915年底完成广义相对论，第二年，德国数学家兼天文学家史瓦西，就求出了广义相对论场方程的第一个有意义的严格解。即当时空中存在一个不变化的球对称质量，而且球体外面是真空时，外部时空将如何弯曲。他的结论是，这时，时空中两点之间的距离将变成

$$\mathrm{d}s^2=-\left(1-\frac{2GM}{c^2r}\right)c^2\mathrm{d}t^2+\left(1-\frac{2GM}{c^2r}\right)^{-1}\mathrm{d}r^2+r^2\mathrm{d}\theta^2+r^2\sin^2\theta\mathrm{d}\varphi^2 \tag{4.5}$$

大家看，与式（4.4）比较，式（4.5）右边的前两项中多了两个带括弧的因子。正是这两个因子的存在，表明时空弯曲了。这就是著名的史瓦西解，它反映了一个不随时间变化的球对称星体外部的时空弯曲情况。

当时第一次世界大战正在紧张进行，应征入伍处在前线的史瓦西得了一种不治之症，被送回后方医院治疗。他在住院期间完成了这一研究。由于他自己行动不便，爱因斯坦代表他在德国皇家学会上宣读了这篇论文。爱因斯坦高度赞扬了他的工作。

遗憾的是，不久之后史瓦西就离开了人世。这场疾病夺去了他年轻的生命，但也为他提供了做出这一成果的机会。否则，战争的枪林弹雨有可能同时剥夺他的生命和科研机会，世界将永远不知道存在过这样一位杰出的学者。

我们要再强调一下，式（4.5）所示的史瓦西解是一个“真空解”，即

球状物体外部全是真空，此解描述的是球体外部真空区的时空弯曲情况。式（4.5）并不反映球状物体内部的时空弯曲情况。

球体内部的时空要用所谓“史瓦西内解”描述。不过，为了抗拒物质间的“万有引力”，必须设想球体内部有某种“排斥力”，许多学者设想了不同的排斥力，结果得到了不同的“史瓦西内解”。

因此史瓦西内解并不唯一，而描述球体外部时空弯曲的“外解”则是唯一的。这就是说，式（4.5）所示的史瓦西解（即外部解）是唯一的。人们最感兴趣的是这个外部解，因为它在天文学和物理学上大有用处。

我们再来分析一下史瓦西解式（4.5）。不难看出，当M＝0时，式（4.5）回到了平直时空的式（4.4）。这表明，物质不存在时，时空是平直的，这当然是正确的。另外，当r→8时，式（4.5）也回到平直时空的式（4.4），这表示在无穷远处，在无限远离这个球对称质量的地方，弯曲时空恢复到平直时空，这当然也是合理的。

线元与度规

式（4.2）～式（4.5）称为相应时空中的“线元”表达式。公式右端“坐标微分元”前的系数，称为时空的度规。例如式（4.5）右端的 $-\left(1-\frac{2GM}{c^2r}\right)$、$\left(1-\frac{2GM}{c^2r}\right)^{-1}$、$r^2$和$r^2\sin^2\theta$就是史瓦西时空中度规的分量。线元和度规，反映了这个时空的弯曲情况和几何性质。求解广义相对论中的爱因斯坦方程，就是要算出这一时空中度规的全部分量。

奇点与奇面

数学物理学家在研究式（4.5）时发现，这个解在

$$r=0 \tag{4.6}$$

处存在一个奇点，在

$$r=\frac{2GM}{c^2} \tag{4.7}$$

处，存在一个奇面（图4-4）。不难看出，当r＝0时，dt^2前的系数$\left(1-\frac{2GM}{c^2 r}\right)$为无穷大；当$r=\frac{2GM}{c^2}$时，$dt^2$前的系数虽然不发散，$dr^2$前的系数$\left(1-\frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1}$却发散了。产生无穷大的地方，时空似乎出现了奇异性。

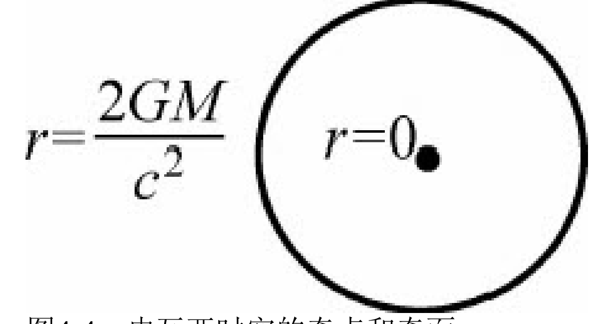


图4-4　史瓦西时空的奇点和奇面

进一步的研究表明，r＝0处的奇异是真奇异，那里时空曲率为无穷大，而且这种无穷大不能通过坐标变换来消除，不管选择什么坐标系，r＝0都是奇点，这种奇点叫内禀奇点。

而$r=\frac{2GM}{c^2}$处的奇面却不一样，那里的时空曲率并不发散，也就是说曲率正常，而且换一个坐标系（例如选择自由下落的坐标系），奇面就会消失。所以奇面处的奇异是假奇异，我们称其为“坐标奇异性”，这种奇异性是由于坐标系选择得不好而造成的，并非时空的固有（内禀）性质。

不过，后来的研究表明，这个奇面虽然是假奇异，但却有重要的物理意义。不难看出，它是球对称黑洞的表面，也就是式（1.4）给出的暗星的表面，它的半径称为引力半径，通常记为r_g。

时空坐标互换

我们来介绍黑洞的一个奇怪性质：在黑洞内外，时空坐标会发生互换。在黑洞内部原来的时间坐标t会变成空间坐标，原来的空间坐标r则会变成时间坐标。

我们先看一下式（4.5），它与式（4.4）有相似之处，时间项dt^2前的系数是负的，而空间项dr^2、$d\theta^2$和$d\varphi^2$前面的系数都是正的，这正是四维时空中时间与空间的区别。然而，上述结论仅在

$$r > \frac{2GM}{c^2} \tag{4.8}$$

的黑洞外部是正确的。在黑洞内部，由于，

$$r < \frac{2GM}{c^2} \tag{4.9}$$

括号中的因子变成了负的，这导致dt^2前的系数变成了正的，与$d\theta^2$、$d\varphi^2$等空间项前的系数符号相同了，而dr^2前的系数却变成了负的。这表明，在黑洞内部，r变成了时间坐标，t变成了空间坐标，于是造成了黑洞内部时空坐标的互换。

单向膜区与表观视界

由于洞内的r变成了时间，洞内的等r面不再是空间的球面，而变成了时间的“等时面”。时间是流逝的，有方向的。任何物质都必须顺着时间的方向前进，都必须“与时俱进”。

如果时间的方向向里，洞内的任何物质都不能停留，都必须向r＝0处会聚。不过这时r＝0已不再是球心，而变成了时间的“终点”。所有的r＝常数的等时面实际上都成了只能向里透的单向膜。物质到达时间的终点r＝0，在那里会处于时间之外。处于“时间之外”是什么意思，现在还不清楚。

如果洞内的时间r方向向外，r＝0就是时间的起点，r为常数的等时面成为了向外的单向膜。物质在时间的起点r＝0处产生（无中生有），然后通过单向膜向外运动，最终抛出洞外。

研究认为，时间向里的洞，就是黑洞，时间向外的洞则是白洞。广义相对论的解只表示$r=\frac{2GM}{c^2}$以里是“洞”，但没有限定它一定是黑洞，还是白洞。

不过，一般认为，这种“洞”是恒星塌缩形成的，形成“洞”的初始情况是物质向内塌陷，这样形成的洞应该是黑洞。所以一般人只讨论黑洞，很少有人讨论白洞，但要指出，广义相对论并不排斥白洞的存在。

黑洞是一切物质和辐射都向里掉，任何物质和辐射都跑不出来的星体，白洞则是不断往外喷东西，但任何东西都掉不进去的星体。

黑洞和白洞的内部都是单向膜区，所以洞内都是真空，任何物质都

不能在单向膜区停留。洞的表面$r=\frac{2GM}{c^2}$是单向膜区的起点。单向膜区的起点称为表观视界。

黑洞内外的光锥图

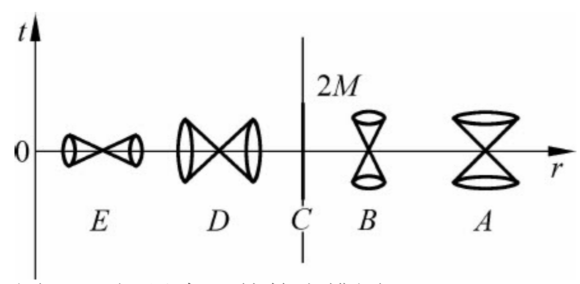


图4-5　视界内、外的光锥图

我们现在画出黑洞内外的光锥图（图4-5），它能使我们更好地理解单向膜区。研究表明，由于时空弯曲，黑洞外部的光锥，越靠近黑洞表面，光锥越扁。在黑洞表面上，光锥退化为一根线。到黑洞内部，由于时空坐标互换，r变成了时间，光锥横过来了，随着靠近奇点r＝0，光锥由“胖”变“瘦”。在“洞”外，光锥的未来指向是向上的，这是由时间t的正向决定的。

但在“洞”内，我们无法简单地用时间r来判断光锥的未来指向。实际上，这要由“洞”形成的初始条件来决定。因为黑洞是塌缩形成的，物质落向星体的中心，这一初始条件决定黑洞内部的未来光锥指向r＝0的方向，也即时间r指向r＝0的方向。我们把未来光锥指向r＝0的“洞”称为黑洞，未来光锥背向r＝0的“洞”，即时间方向背向r＝0的“洞”，称为白洞。

无限红移面

前面曾经谈到，广义相对论预言弯曲时空中的钟会变慢，从而导致那里的光源发出的光会出现红移，这种红移称为引力红移（即时空弯曲造成的红移），实验观测支持了这一结论。

为了探讨黑洞的性质，我们来研究一下引力红移效应。广义相对论认为，一个球对称星体（例如太阳）造成的弯曲时空中，时钟变慢由下式决定：

$$\Delta t = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{1-\frac{2GM}{c^2 r}}} \tag{4.10}$$

式中，M为星体质量，G为万有引力常数，c为真空中的光速。τ为静止在星体（太阳）附近的弯曲时空中的钟指示的时间，r为该钟到星体中心的距离；t为无穷远处（那里时空平直，相对于太阳，地球就可看做是无穷远）观测者的钟所指示的时间。由于公式根号中的因子小于1，所以dt＞dτ。这表明太阳表面的钟走1秒时间，地球处的钟走的时间dt将多于1秒，因此在地球上的观测者看来，太阳表面的钟变慢了。相应的引力红移公式为

$$\nu = \nu_0\sqrt{1-\frac{2GM}{c^2 r}} \tag{4.11}$$

式中，ν为地球观测者拍到的太阳光谱线的频率，ν0则为地球观测者在地球实验室中拍到的同一种元素的同根光谱线的频率。从上式看，显然ν＜ν0，所以在地球上的人看来，从太阳来的光线的频率减小了，即波长增大了，发生了红移。

我们在第三章中已经谈到，实验观测支持了上述结论。现在我们来看，当星体不是太阳，而是黑洞，会发生什么情况。

我们从黑洞表面直到观测者所在的位置，放置一系列钟和光源。对于靠近黑洞表面的钟和光源，由于

$$r \quad r_g = \frac{2GM}{c^2} \tag{4.12}$$

式（4.10）与式（4.11）中根号内的因子趋于零。于是我们看到，位于黑洞表面附近的钟，即使$d\tau$取很小的值，都会有$dt \to \infty$。所以，在远方观测者看来，黑洞表面处的钟完全不走了。我们从式（4.11）则看到，不管ν_0取什么值，都会有$\nu \to 0$，即波长$\lambda \to \infty$，光谱线发生无限红移。因此，我们称黑洞的表面为无限红移面。

事件视界

我们看到史瓦西黑洞的表面，既是单向膜区的起点（表观视界），又是无限红移面。它还有一个重要性质：它是零超曲面（类光超曲面），而且是事件视界。

超曲面是四维时空中的三维曲面。零超曲面有一个“怪异”的特点：它虽然有法矢量，但法矢量的长度为零。这似乎不可思议，我们在三维欧氏几何中熟知，任何曲面都有法矢量和切矢量，切矢量“躺在”曲面上，法矢量则与曲面垂直，二者的长度都不可能是零。这次怎么出现了长度为零的法矢量呢？

这种曲面又称为“迷向曲面”，是伪欧空间和伪黎曼空间特有的。大家都知道欧式空间是平直空间，黎曼空间是弯曲空间，欧氏空间可看做黎曼空间在曲率为零时的特殊情况。所谓“伪”，是指在空间任意两点距离的表达式中，各坐标对应项的前面正负号有差别，例如式（4.4）与式（4.5）的时间项和空间项，差了个正负号。

在这类“伪”空间中，有一类曲面，它的法矢量倒在曲面上，与其中一个切矢量重合，这时法矢量的长度就是零。实际上，这种法矢量是类光矢量。在伪黎曼时空中，矢量的长度可以为正，还可以为零为负。长度为正的矢量就是类空矢量，长度为负的矢量是类时矢量，长度为零的则是类光矢量，也即零矢量。

法矢量长度为零的超曲面称为类光超曲面或零超曲面。黑洞的表面就是类光超曲面，称为事件视界。不可能有任何物质或信息从事件视界以内（即黑洞内部）跑出，并到达无穷远。也就是说，远方的观测者得

不到黑洞内部的任何信息。黑洞的表面，是外部观测者能收到信息的“边界”，所以称其为事件视界。

对零曲面的诠释

为了使读者对零曲面有更直观的了解，我们介绍一下狭义相对论中的时空图。

我们在S系的二维时空图中画出S′系的x′轴与t′轴的位置。x′轴是由t′＝0决定的，而t′轴又是由x′＝0决定的。从洛伦兹变换

$$\begin{cases} x' = \dfrac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \dfrac{t - \dfrac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases} \tag{4.13}$$

可知，t′＝0导致

$$t = \frac{v}{c^2}x \tag{4.14}$$

而x′＝0导致

$$t = \frac{x}{v} \tag{4.15}$$

在S系的t-x图4-6中，式（4.14）描出的就是x′轴，式（4.15）描出的则是t′轴。上二式表明，x′轴与t′轴在t-x图中都是直线，而且斜率都是正的。如果采用c＝1的自然单位制，它们的斜率恰好互为倒数。我们在图4-

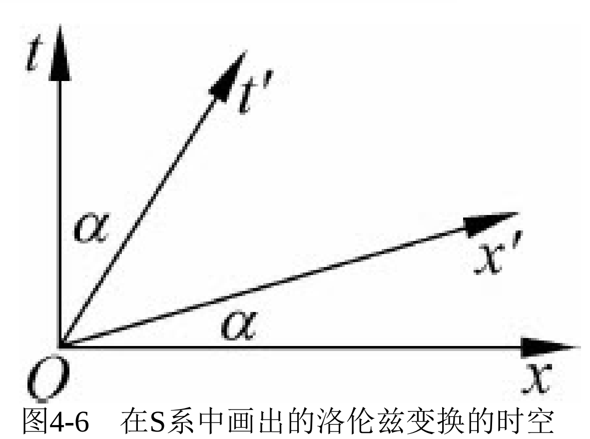


图4-6　在S系中画出的洛伦兹变换的时空

6中画出了上述坐标轴。　　　　　　　　　　　图

图4-6给出的是洛伦兹变换下两个坐标系之间的关系，是在S系中画出的，S′系以速度v相对S系沿x轴正向运动。

显然，t′轴与x′轴是正交的，但从图4-6看，它们似乎不正交。这是闵可夫斯基时空给人的错觉，是由于闵氏时空不是欧几里得时空而是伪欧时空造成的。

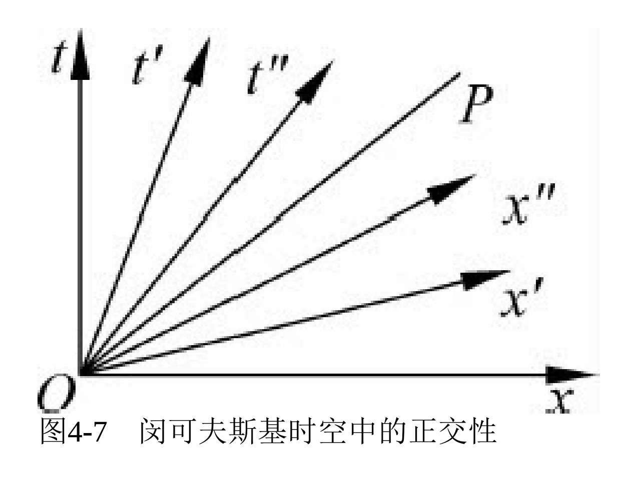


图4-7　闵可夫斯基时空中的正交性

如果有第三个惯性系S″，以更快的速度u相对于S系运动，则它的t″轴与x″轴如图4-7所示。u越大，t″轴与x″轴越接近，当u趋于光速c时，t″轴与x″轴重合在光锥面OP上。

我们知道，t轴可以看作“同时超曲面”（由t＝常数决定的四维时空中的三维超曲面，简称同时面）的法矢量，而x轴为此超曲面的一个切矢量。同样，t′轴是同时面（t′＝常数）的法矢量，x′轴为它的一个切矢量；t″轴为同时面（t″＝常数）的法矢量，x″轴为其一个切矢量。

当u→c时，t″轴与x″轴重合于光锥面上。这种法矢量倒在超曲面内，并与其一个切矢量重合的现象在黑洞研究中极为重要。我们称这样的超曲面为零超曲面，或类光超曲面，简称零曲面或类光曲面，它的法矢量称为零矢量或类光矢量。

存在零曲面是闵氏时空的一个特点，与这种时空的伪欧性质有关。通常的欧氏空间不可能存在这种曲面。

我们看到，光锥面是零曲面。在时空中运动的光波的波前是零曲面，黑洞的表面也是零曲面。黑洞所在的时空，虽然不是伪欧的，但是伪黎曼的。“伪”空间都有可能存在零曲面。

不过应该说明，虽然事件视界都是类光超曲面，但类光超曲面不都是事件视界。例如光波的波前，也是类光超曲面，但它不是事件视界。

我们看到，球对称的史瓦西黑洞的表面，既是事件视界，又是表观视界，还是无限红移面。

飞向黑洞的飞船

下面我们就来看一下，如果一艘飞船驶向黑洞，远方的观测者能看到怎样的景象，飞船上的宇航员又能看到或感受到什么（图4-8）。

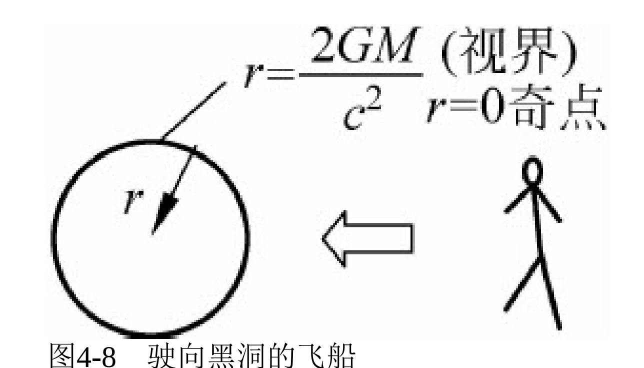


图4-8　驶向黑洞的飞船

如果从观测者到黑洞，在宇宙空间摆放一系列钟和一系列光源。由于时空弯曲的地方钟走得慢，时空弯曲得越厉害，钟就走得越慢。如前面所述，置于黑洞表面的钟将完全停滞不走。而且，时空弯曲得越厉害的地方，光源发出的光红移越大，置于黑洞表面的光源发射的光将发生无限红移，波长λ趋于无穷大。

所以，飞船飞向黑洞时，远方的观测者将看到飞船越飞越慢，飞船上人的动作越来越慢，飞船的颜色也越来越红。最后飞船就粘在黑洞的表面上，宇航员的动作也完全僵化，就像雕塑剧一样。但看不见飞船进入黑洞。

飞船进去没有呢？飞船上宇航员用的钟不是摆在飞船外的钟，宇航员的时间进程也不是飞船外的观测者经历的时间进程，宇航员觉得自己在飞船上的钟并没有变慢，飞船很正常地进入了黑洞。

那么远方观测者为什么没有看见飞船进入黑洞，只看见飞船粘在黑洞表面呢？那是因为飞船的“背影”留在了洞外，远方观测者看到的正是这个“背影”。

在地球上，我们看到一个人从屋里走出去，他的背影一闪就消失

了。这是因为组成他背影的光子一下子就都跑过来了。

然而黑洞表面附近的时空弯曲得太厉害，组成飞船“背影”的光子被束缚、滞留在那里，只能一点点跑出来，越跑越稀，所以远方观测者只能看到飞船的背影越来越暗，飞船越来越慢，越来越发红，最后冻结在黑洞的表面上，消失在那里的黑暗中，却永远看不见飞船落入黑洞。

飞船上的宇航员感觉自己正常地进入黑洞，但他收不到来自前方的信息，因为他已进入黑洞内的单向膜区，只有他的信息可以飞向奇点，奇点那边的信息却根本过不来，也就是说，他看不见奇点。他只是感觉到潮汐力越来越大。

什么叫潮汐力呢？就是造成地球上海洋涨潮落潮的那种力。潮汐力实际上是万有引力的差。

我站在地球表面上，我的重量就是我受到的万有引力。但是我头顶受到的万有引力和脚底受到的万有引力有一个差，这是因为我头顶到地心的距离和脚底到地心的距离有一个差。这个差就是我的身高。这个距离差造成的万有引力差大约是三滴水的重量，它就是我受到的潮汐力，此力太小，我们一般注意不到。

但是月球对地球造成的潮汐力却不能忽略（图4-9）。图中地球的实线表示地球固体部分的表面，虚线表示海面。A点到月球的距离和B点到月球的距离差了一个地球直径，这可是个不能忽略的距离。这使得A处海水受到的月球引力远大于B处海水，这一引力差造成A、B两处海水涨潮，而垂直于月地连线的方向海

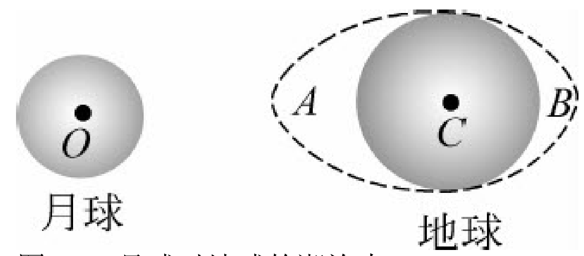


图4-9 月球对地球的潮汐力

水落潮。当然，太阳的引力也对涨落潮有影响，但其影响远小于月球。

进入黑洞的飞船，受到的来自奇点处的巨大潮汐力，远比造成地球上涨落潮的力要大。飞船越接近奇点，受到的潮汐力越大，最终把飞船和宇航员一起撕碎，压入体积为零的奇点。那里是时间终结的地方，飞船和宇航员最后就葬身于那里，并处于“时间之外”。

史瓦西坐标的缺点

式（4.5）所示的史瓦西时空在视界r＝2M（取c＝G＝1的自然单位制）处，存在坐标奇异性，此奇异性把史瓦西时空分成两个部分，洞内和洞外。这两部分各自用一个史瓦西坐标系描写，一个适用于r＜2M，另一个适用于r＞2M，但哪一个都不适用于r＝2M的视界。因此，这两个坐标系是不连通的。

如果用史瓦西坐标来描述一个向黑洞下落的质点（如飞船），或者一束射向黑洞的光。研究表明，质点和光趋近黑洞表面r＝2M时，将会有

$$t \sim \lim_{r \to 2M}[-2M\ln(r-2M)] \quad \infty \qquad (4.16)$$

相对论认为，史瓦西时间t就是静止于无穷远的观测者的真实时间（图4-10）。所以，在无穷远观测者看来，任何质点和光都不能在有限时间内落到黑洞表面，更不用说进入黑洞内部了。

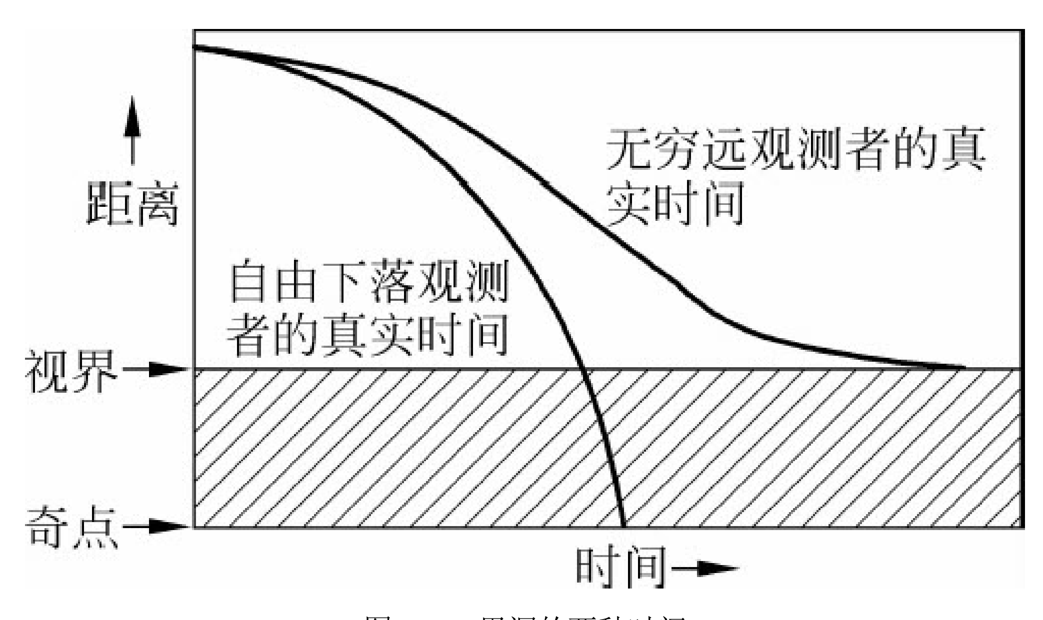


图4-10　黑洞的两种时间

自由下落坐标系

苏联物理学家诺维科夫经过复杂的坐标变换

$$\begin{cases} \tau = \frac{r_0}{2}\left(\frac{r_0}{2M}\right)^{1/2}(\eta + \sin\eta) \\ R = \left(\frac{r_0}{2M} - 1\right)^{1/2} \end{cases} \tag{4.17}$$

$$\begin{cases} t = 2M\ln\left|\frac{\left(\frac{r_0}{2M}-1\right)^{1/2} + \tan\frac{\eta}{2}}{\left(\frac{r_0}{2M}-1\right)^{1/2} - \tan\frac{\eta}{2}}\right| + 2M\left(\frac{r_0}{2M}-1\right)^{1/2}\left[\eta + \frac{r_0}{4M}(\eta + \sin\eta)\right] \\ r = \frac{r_0}{2}(1 + \cos\eta) \end{cases} \tag{4.18}$$

得到一个自由下落坐标系，称为诺维科夫坐标系，其时空线元为

$$\mathrm{d}s^2 = -\mathrm{d}\tau^2 + \left(\frac{R^2+1}{R^2}\right)\left(\frac{r}{R}\right)^2\mathrm{d}R^2 + r^2\mathrm{d}\theta^2 + r^2\sin^2\theta\mathrm{d}\varphi^2 \tag{4.19}$$

此坐标系从黑洞外$r=r_0$处，向黑洞自由下落，式中（τ，R）为此系的时间与空间坐标。（η，r_0）为参数坐标，引入它们是为了使（τ，R）与史瓦西坐标（τ，r）间的关联表达式不至于太复杂。

研究表明，诺维科夫坐标系的时间τ就是自由下落观测者的真实时间（图4-10）。计算表明，这个自由下落观测者将在有限的真实时间τ内，穿过黑洞表面（视界）并很快抵达奇点。

显然，这个坐标系可以同时覆盖黑洞外部和内部，以及视界r＝2M本身，具有一定的优越性。但它还不能最大限度地覆盖整个史瓦西时空。事实上，史瓦西时空的范围要比人们原来想象的更广阔。

史瓦西时空的最大扩展——克鲁斯卡坐标

下面介绍一个能够覆盖整个史瓦西时空的坐标系，克鲁斯卡（Kruskal）坐标系。坐标变换

$$\begin{cases} T = 4M\left(\dfrac{r}{2M}-1\right)^{1/2} \mathrm{e}^{r/4M} \operatorname{sh} \dfrac{t}{4M} \\ R = 4M\left(\dfrac{r}{2M}-1\right)^{1/2} \mathrm{e}^{r/4M} \operatorname{ch} \dfrac{t}{4M} \end{cases} \quad (r > 2M, \text{Ⅰ 区}) \tag{4.20}$$

$$\begin{cases} T = -4M\left(\dfrac{r}{2M}-1\right)^{1/2} \mathrm{e}^{r/4M} \operatorname{sh} \dfrac{t}{4M} \\ R = -4M\left(\dfrac{r}{2M}-1\right)^{1/2} \mathrm{e}^{r/4M} \operatorname{ch} \dfrac{t}{4M} \end{cases} \quad (r > 2M, \text{Ⅱ 区}) \tag{4.21}$$

$$\begin{cases} T = 4M\left(1-\dfrac{r}{2M}\right)^{1/2} \mathrm{e}^{r/4M} \operatorname{ch} \dfrac{t}{4M} \\ R = 4M\left(1-\dfrac{r}{2M}\right)^{1/2} \mathrm{e}^{r/4M} \operatorname{sh} \dfrac{t}{4M} \end{cases} \quad (r < 2M, F \text{ 区}) \tag{4.22}$$

$$\begin{cases} T = -4M\left(1-\dfrac{r}{2M}\right)^{1/2} \mathrm{e}^{r/4M} \operatorname{ch} \dfrac{t}{4M} \\ R = -4M\left(1-\dfrac{r}{2M}\right)^{1/2} \mathrm{e}^{r/4M} \operatorname{sh} \dfrac{t}{4M} \end{cases} \quad (r < 2M, P \text{ 区}) \tag{4.23}$$

把史瓦西时空中的线元式（4.5）变换成

$$\mathrm{d}s^2 = \frac{2M}{r}\mathrm{e}^{-r/2M}(-\mathrm{d}T^2 + \mathrm{d}R^2) + r^2(\mathrm{d}\theta^2 + \sin^2\theta \mathrm{d}\varphi^2) \tag{4.24}$$

此式称为克鲁斯卡坐标系下的线元表达式，（R，T）即克鲁斯卡坐标。从式（4.24）的号差可以判定，T是时间坐标，R是空间坐标。其中r与R、T的关系由下式决定：

$$16M^2\left(\frac{r}{2M}-1\right)\mathrm{e}^{r/2M} = R^2 - T^2 \tag{4.25}$$

容易看出，克鲁斯卡时空不再是与时间坐标T无关的了。然而，它的度规分量在引力半径r_g处不再奇异，坐标奇异性被消除了。当然r＝0的奇点依然存在，内禀奇点不可能通过坐标变换来消除。

克鲁斯卡坐标系可以统一描述整个史瓦西时空，它覆盖了黑洞内、外及视界。而且，从克鲁斯卡时空图4-11可知，它扩大了史瓦西时空。

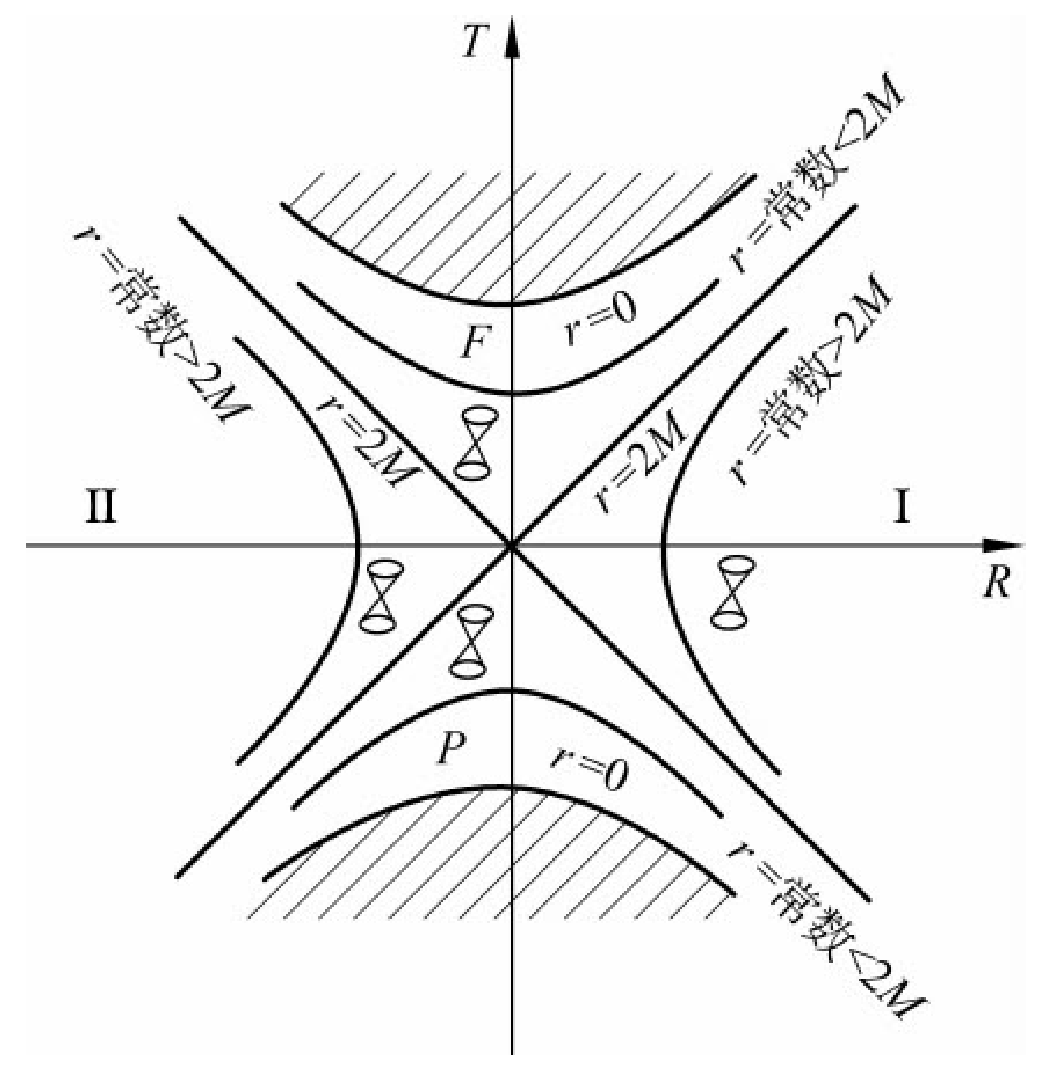


图4-11　克鲁斯卡时空图

图4-11中两条对角线是视界。Ⅰ区即我们通常谈论的黑洞外部宇宙，F区为黑洞区，P区为白洞区，Ⅱ区是另一个洞外宇宙，它和我们的

宇宙没有因果连通，没有任何信息交流。这“另一个宇宙”的存在，是我们原来没有想到的。奇点r＝0分别出现在白洞区和黑洞区，以双曲线形式呈现，阴影区不属于时空。

Ⅰ区和Ⅱ区中r＝常数的双曲线，就是史瓦西时空中静止粒子的世界线。F区和P区中的r＝常数的双曲线为等时线。应当注意，此图中光锥仍呈45°角张开，图中的任何一点，都代表一个二维球面。

显然，白洞P中的粒子和信号可进入宇宙Ⅰ和宇宙Ⅱ，但宇宙Ⅰ、Ⅱ中的粒子和信号都不能退回白洞区。Ⅰ或Ⅱ中的粒子或信号都可以进入黑洞区F，但Ⅰ、Ⅱ之间不能交流。黑洞区的粒子和信号也不能倒回宇宙Ⅰ或Ⅱ，只能向前到达奇点。

应该指出史瓦西解是场方程的真空解，除去r＝0外，都是真空区，洞内的单向膜区也不例外，视界处当然也是真空。

在数学上，克鲁斯卡坐标比史瓦西坐标优越，它能覆盖整个史瓦西流形，而且能对流形上的一切过程（黑洞过程、白洞过程等）作最完备的描述，即除去通往内禀奇点的测地线之外，所有的测地线都可以无限延伸，通向无穷远。所以说，克鲁斯卡度规具有最大解析区和最高完备性。

彭罗斯图

为了研究时空的整体性质，特别是在无穷远处的性质，科学家们建议采用共形变换，对时空尺度进行大力压缩，把“无穷远”压到有限的距离之内，使其成为看得见摸得着的东西。这种图就是彭罗斯图。

下面我们先来定义各种无穷远：

（1）类时未来无穷远I^+：r有限，t→＋∞；

（2）类时过去无穷远I^-：r有限，t→－∞；

（3）类空无穷远I^0：t有限，r→∞；

（4）类光未来无穷远J^+：（t－r）有限，（t＋r）→＋∞；

（5）类光过去无穷远J^-：（t＋r）有限，（t－r）→－∞。

可以证明，在共形变换下，闵可夫斯基时空图4-12可变成彭罗斯图4-13。同样，克鲁斯卡时空图4-11可变成彭罗斯图4-14。应该注意，共形变换实际上是一种尺度伸缩变换，它把“无穷远”压缩到了有限距离之内。

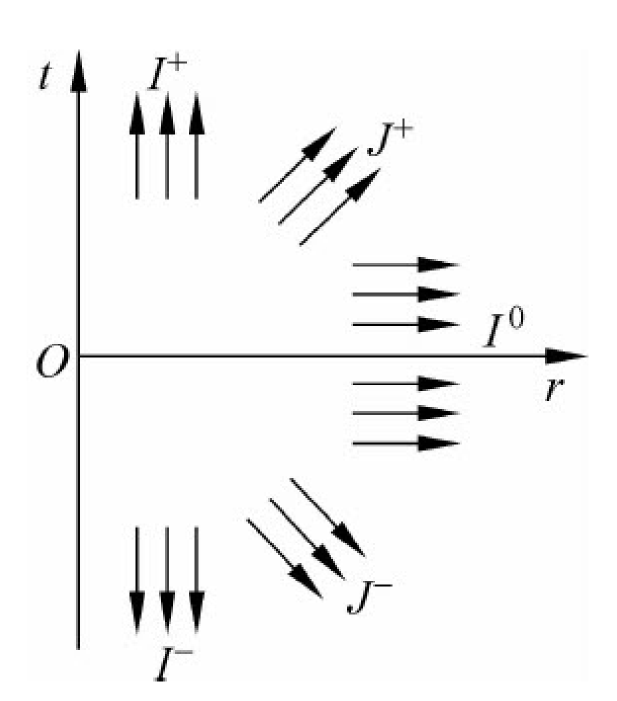


图4-12　闵可夫斯基时空图

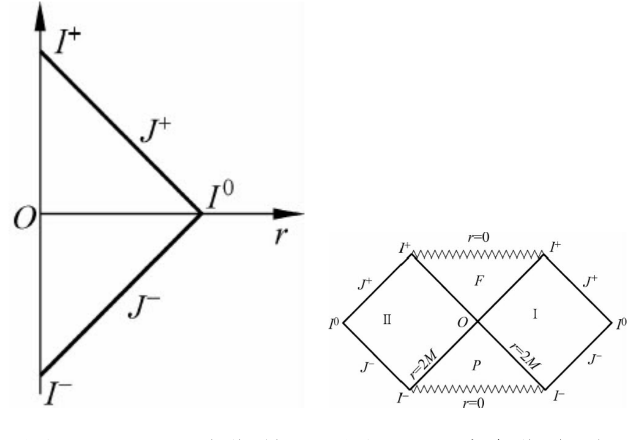


图4-13　闵可夫斯基时空的彭罗斯图

图4-14　克鲁斯卡时空的彭罗斯图

例如，闵可夫斯基时空，它的时间无穷远（类时无穷远）和空间无穷远（类空无穷远），都是既画不出又摸不着的。但利用尺度压缩的共形变换作成彭罗斯图之后，就是既画得出又摸得着的了。I^0点就是空间无穷远，I^+点和I^-点就是时间无穷远，读者不妨用手摸摸这几个无穷远。

应该说明，从我们的上、下、前、后、左、右均可以走向空间无穷远，我们把所有这些空间无穷远“认同”为一个点，就是图中的I^0点。同样，我们把所有的时间未来无穷远认同为一个点I^+；所有的时间过去无穷远也认同为一个点I^-。J^+和J^-两个不含端点（即不含I^+、I^-和I^0点）的开线段，是类光无穷远。

我们的闵可夫斯基时空，对应不含上述无穷远点（即不含I^0、$I^\pm$、$J^\pm$）的开区域。开区域的边界（I^0、$I^\pm$、$J^\pm$）实际上并不对应闵可夫斯基时空中的点。也就是说，闵可夫斯基时空不含无穷远点。上述共形变换的尺度压缩，越趋向无穷远，压缩越厉害。在I^0、$I^\pm$及$J^\pm$处，尺度产生无限压缩。

还应该注意共形变换的另一特点，它是一个保角变换。虽然时空的尺度发生了压缩，但角度保持不变。原时空中呈45°角的光锥，在彭罗斯图中仍保持45°角。

图4-14是克鲁斯卡时空的彭罗斯图。此图中任何一点代表一个r取定值的二维球面。Ⅰ、Ⅱ是两个相互不通信息的宇宙。每个宇宙均有自己的类时无穷远$I^{\pm}$、类光无穷远$J^{\pm}$和类空无穷远I^{0}，r＝2M（采用自然单位制）是视界。F是黑洞区，P是白洞区。r＝0是内禀奇点。奇点和边界（I^{0}、$I^{\pm}$、$J^{\pm}$）均不属于克鲁斯卡时空。此时空也是一个开区域，光锥仍保持45°角。

爱因斯坦-罗森桥

对于Ⅰ和Ⅱ这两个相互不通信息的宇宙，O点是一个“喉”，或者叫做“虫洞”，又叫做爱因斯坦-罗森桥。这两个宇宙可以通过此虫洞相通。但是，通过这个虫洞的世界线都是类空的，也就是说，都是超光速物体的世界线。这就是说，只有超光速运动的质点或飞船才能通过此虫洞，从一个宇宙进入另一个宇宙，而超光速运动是相对论理论所禁止的，所以这是一种不可穿越的虫洞。

图4-15是爱因斯坦-罗森桥的镶嵌图。它是这样得到的，在史瓦西时空中，取时间t＝常数，$\theta=\frac{\pi}{2}$，于是得到一个用（r，φ）描述的二维曲面。再引入一维新的空间z，z不是t也不是θ，是另一维空间。把表示爱因斯坦-罗森桥的曲面（r，φ）镶嵌到此三维欧氏空间中，就得到图4-15。

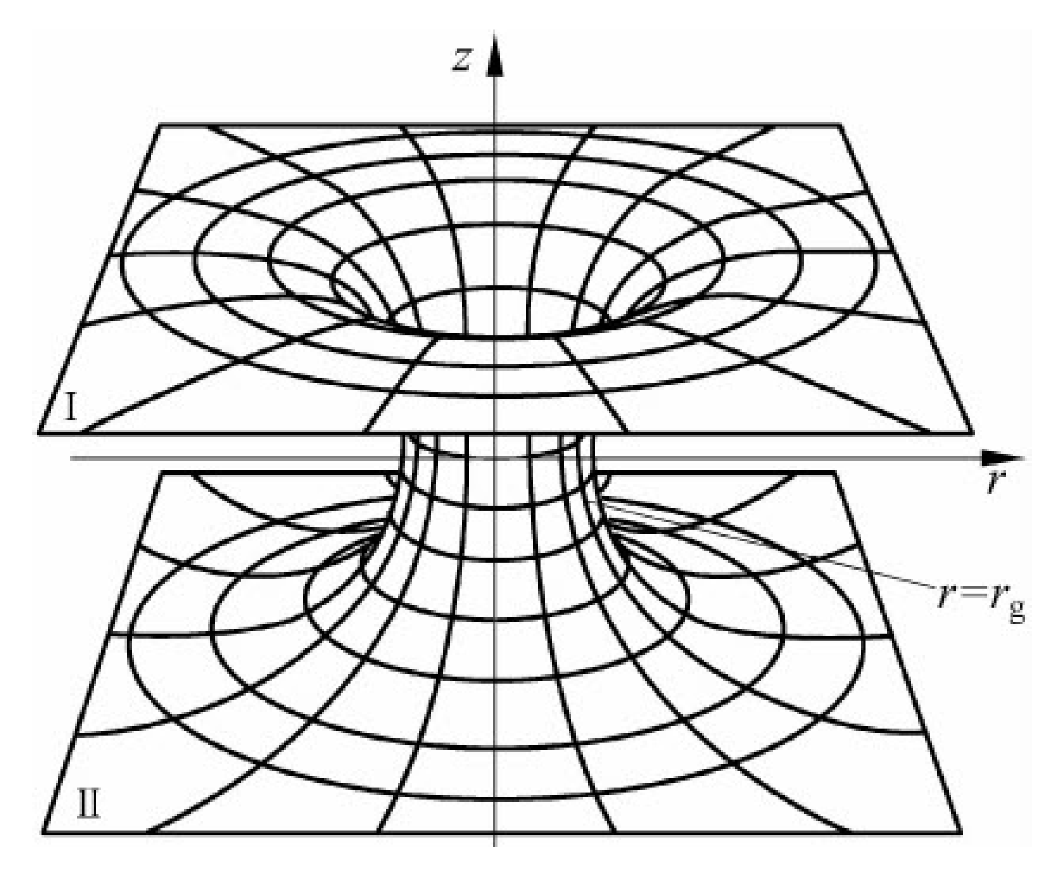


图4-15　爱因斯坦-罗森桥的镶嵌图

注意，图中只有这个曲面属于史瓦西时空，面以外的空间不属于史瓦西时空。曲面上Ⅰ、Ⅱ两个部分属于图4-11（或图4-14）中互无因果联系的两个宇宙Ⅰ与Ⅱ。它们通过$r=r_g$的“喉”相连。

再强调一下，图4-15中，只有曲面属于史瓦西时空的Ⅰ、Ⅱ两个宇宙，所谓“喉”也只是指Ⅰ、Ⅱ两部分曲面相连的部分，不包括曲面包围的中空“管道”。Ⅰ、Ⅱ之间可能交流的信号，是沿曲面经r_g进入对方的，但都必须是超光速信号，而超光速运动是不可能的，所以Ⅰ、Ⅱ两部分宇宙互不通信息，更没有物质交流。



绘画: 张京

第五章　黑洞附近的物理效应

带电球体外部的时空

不随时间变化的、带电球状物体周围的时空弯曲状况，可以参照不带电的史瓦西解的求解方式，比较容易地求出。不过这时要用到电磁场方程，把麦克斯韦的电磁方程与爱因斯坦的广义相对论方程联立起来求解，因而也需要克服一些困难。

1916年和1918年Reissner和Nordstrom分别独立地算出了这个解，因此称为Reissner-Nordstrom解（简称R-N解或带电史瓦西解）。在自然单位制下，其时空弯曲情况可以用线元

$$\mathrm{d}s^2 = -\left(1-\frac{2M}{r}+\frac{Q^2}{r^2}\right)\mathrm{d}t^2+\left(1-\frac{2M}{r}+\frac{Q^2}{r^2}\right)^{-1}\mathrm{d}r^2+r^2\mathrm{d}\theta^2+r^2\sin^2\theta\mathrm{d}\varphi^2 \tag{5.1}$$

表出，式中M、Q分别为场源的质量和电荷。

这是一个电磁真空解，与史瓦西解不同，这个解由两个参量决定，总质量M和总电荷Q。另外，在带电球体的外面，不是完全的真空，而是存在电磁场。不过，除电磁场外不存在任何其他物质。它所描述的弯曲时空是静态、球对称的，也就是说，时空的弯曲情况呈现球对称，而且不随时间变化。

转动星体外部的时空

1963年，克尔（R.P.Kerr）得出了场方程的一个稳态轴对称解。所谓稳态，就是不随时间变化。此解描述的是一个以恒定角速度转动的星体外部（外部是真空）的时空弯曲情况。那是一个处于真空状态的不随时间变化的、轴对称的弯曲时空。在自然单位制下，它的线元是

$$ds^2 = -\left(1-\frac{2Mr}{\rho^2}\right)dt^2+\frac{\rho^2}{\Delta}dr^2+\rho^2 d\theta^2+\left[(r^2+a^2)\sin^2\theta + \frac{2Mra^2\sin^4\theta}{\rho^2}\right]d\varphi^2-\frac{4Mra\sin^2\theta}{\rho^2}dtd\varphi \quad (5.2)$$

其中

$\rho^2=r^2+a^2\cos^2\theta$，$\Delta=r^2-2Mr+a^2$

不难看出度规（即坐标微分元前面的系数）不含t和φ。不含t表明时空弯曲情况不随时间变化，因而处于稳态；不含φ表明时空弯曲情况在角φ的各个方向完全一样，因而是轴对称的。

与史瓦西时空不同，此解也由两个参量决定，即质量M和角动量J。在式（5.2）中，角动量J是以单位质量角动量a的形式出现的，$a=J/M$。

此解的求出十分艰难，克尔在求解过程中有不少创新。最初许多人看不懂他的求解方法。他最早在一个天体物理研讨会上报告了自己的工作，但没有引起与会者的注意。

那时天文界的兴趣集中在“类星体”上。这是一种奇怪的天体，它红移量很大，按照哈勃定律，它应该离我们非常远，但它又特别亮，这表

明它发光能力极强，用当时已知的物理知识很难解释。与会者一直在热烈讨论类星体，克尔介绍了自己的工作后，没有人理会他，大家仍在议论类星体。一位了解克尔工作的意义的学者站起来发言，提醒大家注意克尔的工作，但仍无人理会，大家继续讨论类星体。

后来学术界终于认识到了克尔解的重大意义，这个解的出现极大地推动了相对论天体物理学的研究，并导致了黑洞研究的高潮。

转动带电星体外部的时空

后来，纽曼（E．T．Newman）等人把克尔解推广到带电情况，得到克尔-纽曼（Kerr-Newman）解，它描述一个转动带电星体的外部引力场，即描述该星体外部时空的弯曲情况。在自然单位制下，其线元为

$$ds^2=-\left(1-\frac{2Mr-Q^2}{\rho^2}\right)dt^2+\frac{\rho^2}{\Delta}dr^2+\rho^2d\theta^2+\left[(r^2+a^2)\sin^2\theta+\frac{(2Mr-Q^2)a^2\sin^4\theta}{\rho^2}\right]d\varphi^2-\frac{2(2Mr-Q^2)a\sin^2\theta}{\rho^2}dtd\varphi \quad (5.3)$$

式中$\rho^2=r^2+a^2\cos^2\theta$，$\Delta=r^2-2Mr+a^2+Q^2$。与克尔解类似，这也是一个稳态轴对称的时空，度规中不含t和φ。它由三个参数决定，星体的总质量M、总角动量J和总电荷Q，角动量J也是以单位质量角动量a来显示的，$a=J/M$。

注意，上述解都是真空解，即星体外部都是真空区。带电情况下，星体外部是电磁真空，即不存在电磁场以外的任何物质。

克尔-纽曼时空在$M\neq0$，$J\neq0$但$Q=0$时回到克尔时空；在$M\neq0$，$Q\neq0$但$J=0$时回到R-N时空；在$M\neq0$，$J=0$，$Q=0$时回到史瓦西时空。读者不妨参照式（5.1）～式（5.3），以及式（4.5）自己算一下。研究表明，克尔-纽曼时空是最一般的稳态轴对称时空，因而十分重要。

再谈度规

我们看到式（5.2）和式（5.3）所示的克尔时空与克尔-纽曼时空的度规，都比以前看到的时空度规式（4.3）～式（4.5）以及式（5.1）更为复杂，出现了dtdφ项。

实际上，度规共有16项（即16个分量），只不过在许多情况下，不少度规的分量为零罢了。

在相对论中，为了表达简洁，弯曲时空中的线元和度规通常简写为

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu \quad (\mu,\nu = 0,1,2,3) \tag{5.4}$$

其中，上、下角标各有一个μ，还各有一个ν。爱因斯坦规定，重复的上下角标表示求和。这是爱因斯坦本人在数学上的一个小创造。以往表示求和时，数学家都会在表达式前面加一个求和号$\sum$，例如

$$ds^2 = \sum_{\mu,\nu} g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$$

爱因斯坦发现，只要规定重复角标代表求和，$\sum$号就可以省去，不会造成混乱，也不会影响计算。

若是展开来写，式（5.4）的右边会十分复杂，有16项

$$ds^2 = g_{00}(dx^0)^2 + g_{01}dx^0dx^1 + g_{10}dx^1dx^0 + g_{11}(dx^1)^2 + \ldots$$

式中$x^0=ct$，表示时间，c为光速。x^1、x^2和x^3表示3个空间坐标，如（x，y，z）或（r，θ，φ）。

度规$g_{\mu\nu}$是时空坐标（x^0，x^1，x^2，x^3）的函数，它是对称的

$$g_{\mu\nu}=g_{\nu\mu}$$

例如$g_{01}=g_{10}$，$g_{12}=g_{21}$，等等。所以，16个度规分量中只有10个独立。

闵可夫斯基时空度规为$g_{00}=-1$，$g_{11}=g_{22}=g_{33}=1$，其余分量（如g_{01}，g_{12}等）为零。

史瓦西度规为

$$g_{00}=-\left(1-\frac{2GM}{c^2r}\right),\quad g_{11}=\left(1-\frac{2GM}{c^2r}\right)^{-1},\quad g_{22}=r^2, g_{33}=r^2\sin^2\theta \tag{5.5}$$

其余分量为零。

在自然单位制（$c=G=\hbar=1$）下，克尔-纽曼时空度规为

$$\begin{cases} g_{00}=-\left(1-\dfrac{2Mr-Q^2}{\rho^2}\right)=-\dfrac{(r-r_+^s)(r-r_-^s)}{\rho^2} \\ g_{11}=\dfrac{\rho^2}{\Delta}=\dfrac{\rho^2}{(r-r_+)(r-r_-)} \\ g_{22}=\rho^2 \\ g_{33}=\left[(r^2+a^2)\sin^2\theta+\dfrac{(2Mr-Q^2)a^2\sin^4\theta}{\rho^2}\right] \\ g_{03}=g_{30}=-\dfrac{(2Mr-Q^2)a\sin^2\theta}{\rho^2} \end{cases} \tag{5.6}$$

其中$\rho^2=r^2+a^2\cos^2\theta$，$\Delta=r^2-2Mr+a^2$。$r_+$、$r_-$、$r_+^s$、$r_-^s$的意义可参见下面式（5.10）及式（5.17），度规的其余分量为零。

前面已经讲过，知道了度规，就知道了时空的弯曲情况。求解广义相对论中的爱因斯坦方程（即场方程），就是要求出全部度规函数（共10个独立分量）。场方程中表示时空曲率的量$R_{\mu\nu}$和R是度规及其一阶导数和二阶导数的函数，所以场方程是关于度规的二阶微分方程，而且是非线性方程，没有通行的解法，求解过程十分困难、复杂。每求出一个解，都可以用求解者的名字命名。

时轴正交，静态与稳态

度规中两个下标不同的分量（例如g_{01}、g_{12}、…），表示相关的两个坐标轴是否正交（垂直）。例如，上式中$g_{01}=0$，表示时间轴（x^0，即t轴）与空间的x^1轴（此处即r轴）正交；$g_{12}=0$，表示x^1与x^2两个空间轴（即r，θ轴）正交。$g_{03}\neq 0$则表示时间轴与x^3轴（即φ轴）不正交，在物理上这反映了作为引力源的物体在绕φ轴转动，整个时空也被这一转动所拖动。

不难看出，平直的闵可夫斯基时空和弯曲的史瓦西时空，所有的四个轴都是正交的，克尔时空和克尔-纽曼时空，由于$g_{03}\neq 0$，时间轴和一个空间轴不正交。

时间轴和3个空间轴都正交的时空（即$g_{01}=g_{02}=g_{03}=0$的时空），称为“时轴正交”的时空。

前面已经谈到，如果度规函数不含时间t（即x^0），时空就不随时间变化，这样的时空称为稳态时空。如果稳态时空时轴正交，就称为静态时空。显然，静态时空一定稳态，而稳态时空不一定静态。闵可夫斯基时空、史瓦西时空和R-N时空都是静态时空，而克尔时空和克尔-纽曼时空则是稳态时空。

奇异性

从式（5.3）不难看出，克尔-纽曼时空在

$$\rho^2 = r^2 + a^2\cos^2\theta = 0 \qquad (5.7)$$

和

$$\Delta = r^2 - 2Mr + a^2 + Q^2 = 0 \qquad (5.8)$$

处，存在奇异性。即在这两处度规的某些值会出现无穷大。研究表明，式（5.7）所示的奇异性的位置出现在

$$\begin{cases} r = 0 \\ \theta = \pi/2 \end{cases} \qquad (5.9)$$

处，呈现为一个奇环。这是一种内禀奇异性，时空曲率为无穷大，而且不能通过坐标变换来消除。式（5.8）所示的奇异性位于

$$r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2 - Q^2} \qquad (5.10)$$

处，呈现为两个椭球面。这是一种坐标奇异性。注意，因为采用了自然单位制，所以本节的公式才显得比较简洁。如果恢复到普通单位时，式（5.10）则写成

$$r_{\pm} = \frac{GM}{c^2} \pm \sqrt{\left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{J}{Mc}\right)^2 - \frac{GQ^2}{c^4}} \qquad (5.11)$$

需要注意的是，恢复到普通单位时，单位质量角动量a应改写为a＝J/（Mc）。

上述三种时空中都存在黑洞，式（5.10）给出的坐标奇异性出现的地方，就是黑洞的事件视界。

带电的黑洞

当带电史瓦西时空中的物质和电荷聚集到星体中心时，就会出现黑洞，称为Reissner-Nordstrom黑洞，或带电史瓦西黑洞（图5-1）。

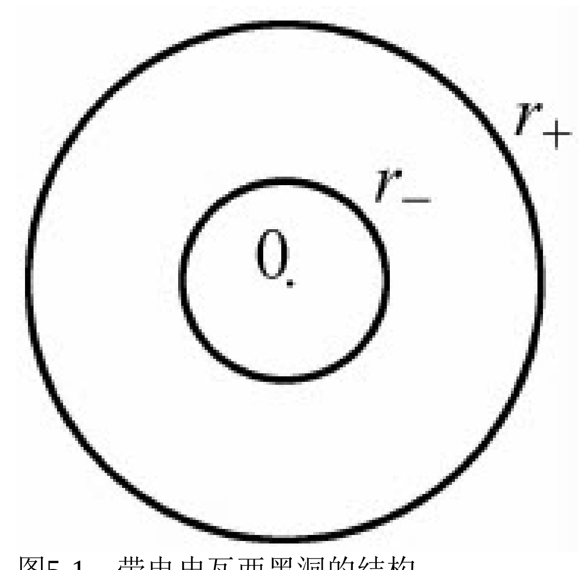


图5-1　带电史瓦西黑洞的结构

黑洞的中心r＝0处，存在奇点。这种黑洞有两个视界和两个无限红移面。外视界r_+与外无限红移面重合，内视界r_-与内无限红移面重合，分别位于

$$r_\pm = \frac{GM}{c^2} \pm \sqrt{\left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 - \frac{GQ^2}{c^4}} \tag{5.12}$$

处，式中M、Q分别为黑洞的质量和电荷，G、c分别为万有引力常数和光速。当使用自然单位制（$G=c=\hbar=1$）时，上式简化为

$$r_\pm = M \pm \sqrt{M^2 - Q^2} \tag{5.13}$$

显然，它们都是球面。

这种黑洞的单向膜区位于内、外视界之间。在那个区域r表示时间，t表示空间。从外部穿过外视界进入单向膜区的物质将不能停留，必须落向内视界，并穿过它进入r＜r_-的区域。应该注意，r＜r_-的区域不是单向膜区，t恢复为时间，r恢复为空间，进入那里的物质不一定趋向奇点。

相反，研究表明，r＝0处的奇点（现在是球心）似乎表现出斥力，拒绝让任何物质靠近它。只有光可以到达这个奇点。如果进入洞中的火箭想靠近奇点，则必须加速，而且只有加速度趋于无穷大时才能到达奇点。

旋转的黑洞

当克尔时空中的物质都聚向中心时，也会出现黑洞，称为克尔黑洞。克尔黑洞也有两个视界

$$r_{\pm} = \frac{GM}{c^2} \pm \sqrt{\left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{J}{Mc}\right)^2} \tag{5.14}$$

式中M、J分别为黑洞的质量和角动量。当使用自然单位制时，上式化简为

$$r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2} \tag{5.15}$$

其中

a＝J/（Mc）

为单位质量的角动量。这种黑洞也有两个无限红移面，而且无限红移面和视界分开了，内、外无限红移面分别是

$$r^{s}_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2 \cos^2\theta} \tag{5.16}$$

这种黑洞的结构如图5-2所示。最外面是外无限红移面，好像一个橘子。外视界犹如一个大核桃，里面套个小核桃，那就是内视界。再往里是内无限红移面。

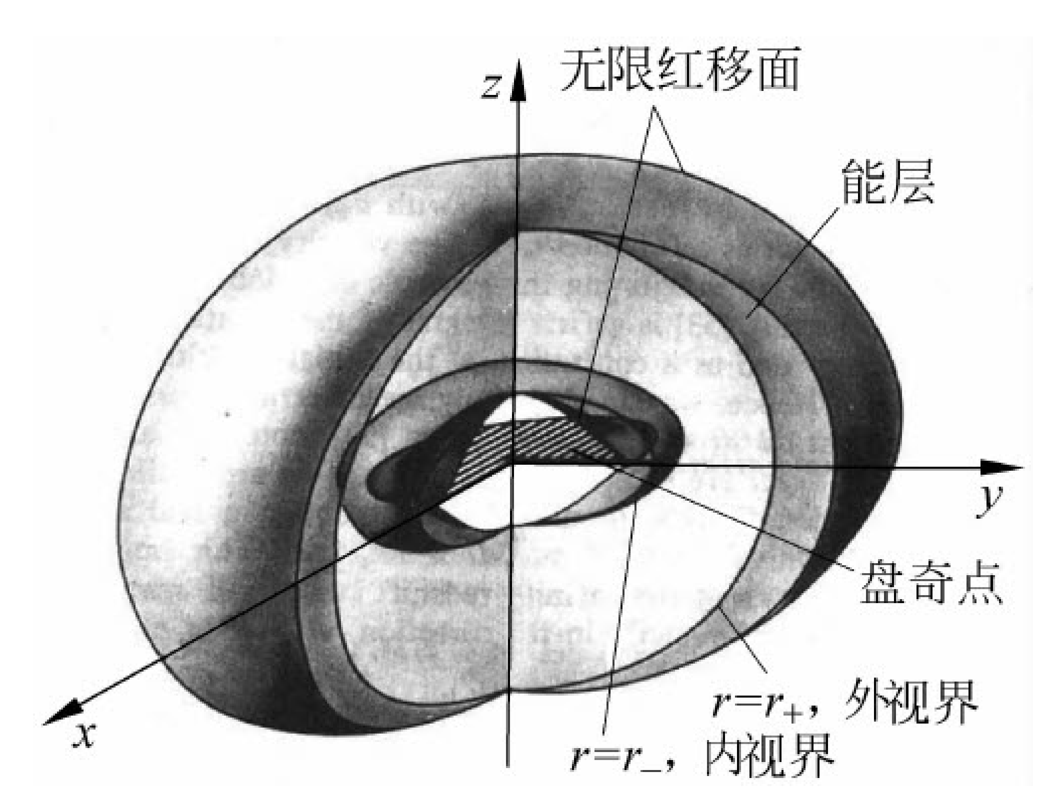


图5-2　克尔黑洞的剖面图

从式（5.14）或式（5.15）看，r_+和r_-似乎均与θ、φ角无关，内、外视界好像都是球面。实际上不是这样，内、外视界其实都是轴对称的椭球。

造成这一误解的原因是，我们用来描述克尔黑洞的坐标不是球坐标，而是椭球坐标。

视界与无限红移面之间是能层，在r_+与r^s_+之间是外能层，在r_-与r^s_-之间是内能层。能层只是黑洞的附属物。穿过外无限红移面进入外能层的飞船还不算进入了黑洞，它仍可以逃出去。克尔黑洞的边界是外视界，穿过外视界才算进入了黑洞，就逃不出去了。

单向膜区位于外视界r_+与内视界r_-之间，那里是时空坐标互换区

（即单向膜区），进入那里的飞船或物质将不能停留，必须穿过内视界进入$r<r_-$的区域。那里不再是时空坐标互换区，飞船可以在那里自由飞行。

注意，克尔黑洞的中心不是奇点，而是奇环。在图5-2中，读者可以看到一个用阴影表示的盘，盘内部并不奇异，只有它的边缘是奇异的，那就是奇环。奇环不能简单地用$r=0$来表示，$r=0$表示的是整个用阴影表出的盘，再加上$\theta=\frac{\pi}{2}$的限制才表示盘的边缘，那就是奇环。读者可能感到很有趣，$r=0$不表示球心，而表示一个圆盘，这也是由于我们采用的坐标不是普通的球坐标，而是椭球坐标的缘故。

奇环位于

$$\begin{cases} r=0 \\ \theta=\pi/2 \end{cases}$$

处，这正是式（5.9）给出的内禀奇异性的位置。

旋转、带电的黑洞

很容易把上述工作拓广到旋转、带电的黑洞，这种黑洞称为克尔-纽曼黑洞，或带电克尔黑洞。克尔-纽曼黑洞的结构与克尔黑洞非常相似，有两个视界

$$r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2 - Q^2}$$

此即式（5.10）。用普通单位制表出则为

$$r_{\pm} = \frac{GM}{c^2} \pm \sqrt{\left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{J}{Mc}\right)^2 - \frac{GQ^2}{c^4}}$$

此即式（5.11）。这种黑洞也有两个无限红移面

$$r_{\pm}^{s} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2\cos^2\theta - Q^2} \qquad (5.17)$$

它们都互不重合。克尔-纽曼黑洞也有内、外两个能层，中心也是一个奇环。也位于式（5.9）

$$\begin{cases} r = 0 \\ \theta = \pi/2 \end{cases}$$

所示的内禀奇异性位置。

二者的差别是，克尔黑洞的奇环与内无限红移面接触（图5-3左），克尔-纽曼黑洞的奇环则不与内无限红移面接触（图5-3右）。这是因为克尔-纽曼奇环带电的缘故。

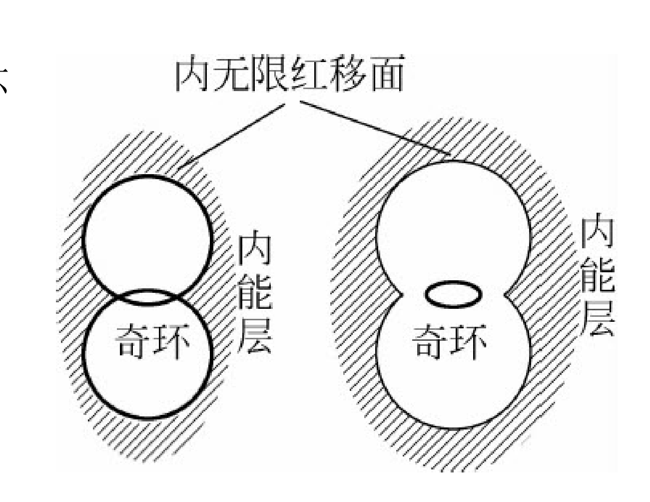


图5-3　奇环与内无限红移面

单向膜区与能层

图5-2是克尔黑洞的剖面图（克尔-纽曼黑洞的剖面图与此类似），两个视界之间的区域是单向膜区。外视界r_+与外无限红移面r^s_+之间的空间称为外能层，它实际上位于黑洞之外。内视界r_-和内无限红移面r^s_-之间的区域称内能层。图中能层区用阴影部分显示出来，下面简述各区的时空特征。为此，我们先把式（5.3）所示的克尔-纽曼时空度规简写为

$$ds^2 = g_{00}dt^2 + 2g_{03}dtd\varphi + g_{11}dr^2 + g_{22}d\theta^2 + g_{33}d\varphi^2 \qquad (5.18)$$

其中各度规分量如式（5.6）所示。

现在我们来试图判断一下克尔-纽曼黑洞各时空区的时间坐标和空间坐标。

（1）外无限红移面之外（$r > r^s_+$）：

$g_{00} < 0$，$g_{11} > 0$，t表示时间，r表示空间；

（2）外能层区（$r^s_+ > r > r_+$）：

$g_{00} > 0$，$g_{11} > 0$，时空概念看不清；

（3）单向膜区（$r_+ > r > r_-$）：

$g_{00} > 0$，$g_{11} < 0$，t表示空间，r表示时间，时空坐标互换；

（4）内能层区（$r_- > r > r_-^s$）：

$g_{00} > 0$，$g_{11} > 0$，时空概念看不清；

（5）内能层以内（$r_-^s > r$）：

$g_{00} < 0$，$g_{11} > 0$，t表示时间，r表示空间。

我们看到，内无限红移面包围着一块与洞外宇宙时空属性相同的区域，t表示时间，r表示空间。在单向膜区，时空坐标互换，t表示空间，r表示时间。但在两个能层区，g_{00}与g_{11}同号，时空概念看不清楚。

如果我们采用拖动系，即考虑到任何物理的坐标系都不可避免地被转动的球体所拖动，假设拖动角速度为

$$\dot{\varphi} = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = -\frac{g_{03}}{g_{33}} \tag{5.19}$$

则线元式（5.18）将化为

$$\begin{aligned} \mathrm{d}s^2 &= \left(g_{00} - \frac{g_{03}^2}{g_{33}}\right)\mathrm{d}t^2 + g_{11}\mathrm{d}r^2 + g_{22}\mathrm{d}\theta^2 + g_{33}\left(\mathrm{d}\varphi + \frac{g_{03}}{g_{33}}\mathrm{d}t\right)^2 \\ &= \hat{g}_{00}\mathrm{d}t^2 + g_{11}\mathrm{d}r^2 + g_{22}\mathrm{d}\theta^2 \end{aligned} \tag{5.20}$$

式中

$$\begin{aligned} \hat{g}_{00} &= g_{00} - \frac{g_{03}^2}{g_{33}} = \frac{-\rho^2\Delta}{(r^2+a^2)^2 - \Delta a^2\sin^2\theta} = \frac{-\rho^2(r-r_+)(r-r_-)}{(r^2+a^2)\rho^2 + (2Mr-Q^2)a^2\sin^2\theta} \\ g_{11} &= \frac{\rho^2}{(r-r_+)(r-r_-)} \end{aligned} \tag{5.21}$$

在能层中$\hat{g}_{00} < 0$，$g_{11} > 0$，此时t仍为时间，r仍为空间，能层中时空的

概念可以看清楚了。

下面我们将证明，能层内的观测者和粒子一定会被引力场拖动。这是因为能层内静止的观测者和粒子将是超光速的，所以能层内不可能存在静止的物体，这也是无限红移面又被称为静界的原因。静界就是存在静止观测者和粒子的界限，静界以外可以存在静止观测者和静止粒子，但静界以内不行。

综上所述，对于克尔-纽曼黑洞，时空坐标互换的单向膜区，仅存在于内、外视界之间。在外视界以外，内视界以内，t都表示时间，r都表示空间。

拖曳效应与静界

下面我们就来介绍，为什么能层中的质点不能处于静止状态，一定会被转动的黑洞拖动，与黑洞一起旋转，这种效应叫拖曳效应。

现在考虑克尔-纽曼时空中的一个静止质点，静止意味着dr＝dθ＝dφ＝0，从式（5.3）可以看出，这时线元简化为

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Mr - Q^2}{\rho^2}\right)dt^2 = \frac{-(r - r_+^s)(r - r_-^s)}{\rho^2}dt^2 \qquad (5.22)$$

其中r_+^s与r_-^s分别为式（5.17）所示的内外无限红移面。在$r > r_+^s$或$r < r_-^s$时，$ds^2 < 0$，这表示静止在外无限红移面以外，或内无限红移面以里的质点，时空间隔为负，描出的世界线类时，处于亚光速运动状态，这是相对论允许的。所以，质点可以在内无限红移面以里，或外无限红移面之外的广大时空区静止。

在$r_+ < r < r_+^s$的外能层区，以及$r_-^s < r < r_-$的内能层区，从式（5.22）不难看出，这时静止质点的$ds^2 > 0$，它表示时空间隔为正（类空），静止质点的世界线类空，该静止质点实际上处在超光速运动状态，这是相对论所不允许的。

当$r_- < r < r_+$时，即质点处于内外视界之间的单向膜区中，此区中时空坐标互换，t表示空间，r表示时间，静止质点不能用式（5.22）描述。我们前面已经谈到，这时质点不能静止，必定穿过单向膜区和内视界，进入内能层区。

那么，质点可不可以在无限红移面上静止呢？从式（5.22）不难看

出，当r＝r_+^s或$r=r_-^s$时，都有ds²＝0，间隔为零，世界线类光，它表示这样的质点将以光速运动，这也是相对论所不允许的。

所以质点不能在能层（包括外能层和内能层）中静止，也不能在无限红移面上静止，只能在外无限红移面之外（$r>r_+^s$）或内无限红移面以内（$r<r_-^s$）的广大区域内静止。

所以，我们说无限红移面是质点静止的界线，因此黑洞的无限红移面又称“静界”。

能层中的质点，不能静止，一定会被转动的黑洞“拖动”。有人认为，这种拖曳效应，正是马赫当年预言的效应。马赫早在相对论诞生之前，就猜测转动物体（或作加速运动的物体）会对外部物体产生拖动，并认为这一拖动是惯性效应的根源。当然，这种说法并未得到一致的公认。

可以证明，能层中质点被拖曳的速度

$$\Omega=\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$$

有一个范围，如下式所示：

$$\frac{-g_{03}-\sqrt{-\hat{g}_{00}g_{33}}}{g_{33}}\leqslant\Omega\leqslant\frac{-g_{03}+\sqrt{-\hat{g}_{00}g_{33}}}{g_{33}}\qquad(5.23)$$

质点转动的角速度就被限制在上述范围之中。由于在内、外视界上$\hat{g}_{00}=0$，从式（5.23）不难看出内、外视界上的拖曳速度必须取确定值，可以算出为

$$\Omega_\pm=\lim_{r\to r_\pm}\left(-\frac{g_{03}}{g_{33}}\right)=\frac{a}{r_\pm+a^2}$$

人们把外视界的转动角速度Ω_+称为黑洞的转动角速度，通常用Ω_H表示

$$\Omega_{\mathrm{H}}=\frac{a}{r_{\mathrm{H}}^{2}+a^{2}} \tag{5.24}$$

其中H表示外视界。

不过，应该注意，此速度恰为光速，所以质点不可能在视界面上静止，可把Ω_H看作沿视界面运动的光线的速度。

克尔-纽曼时空的彭罗斯图

图5-4给出了克尔-纽曼时空的彭罗斯图，图中没有画出无限红移面，r_+为外视界，r_-为内视界。Ⅰ区是洞外宇宙，Ⅱ区是单向膜区，Ⅲ区是内视界以里的区域。

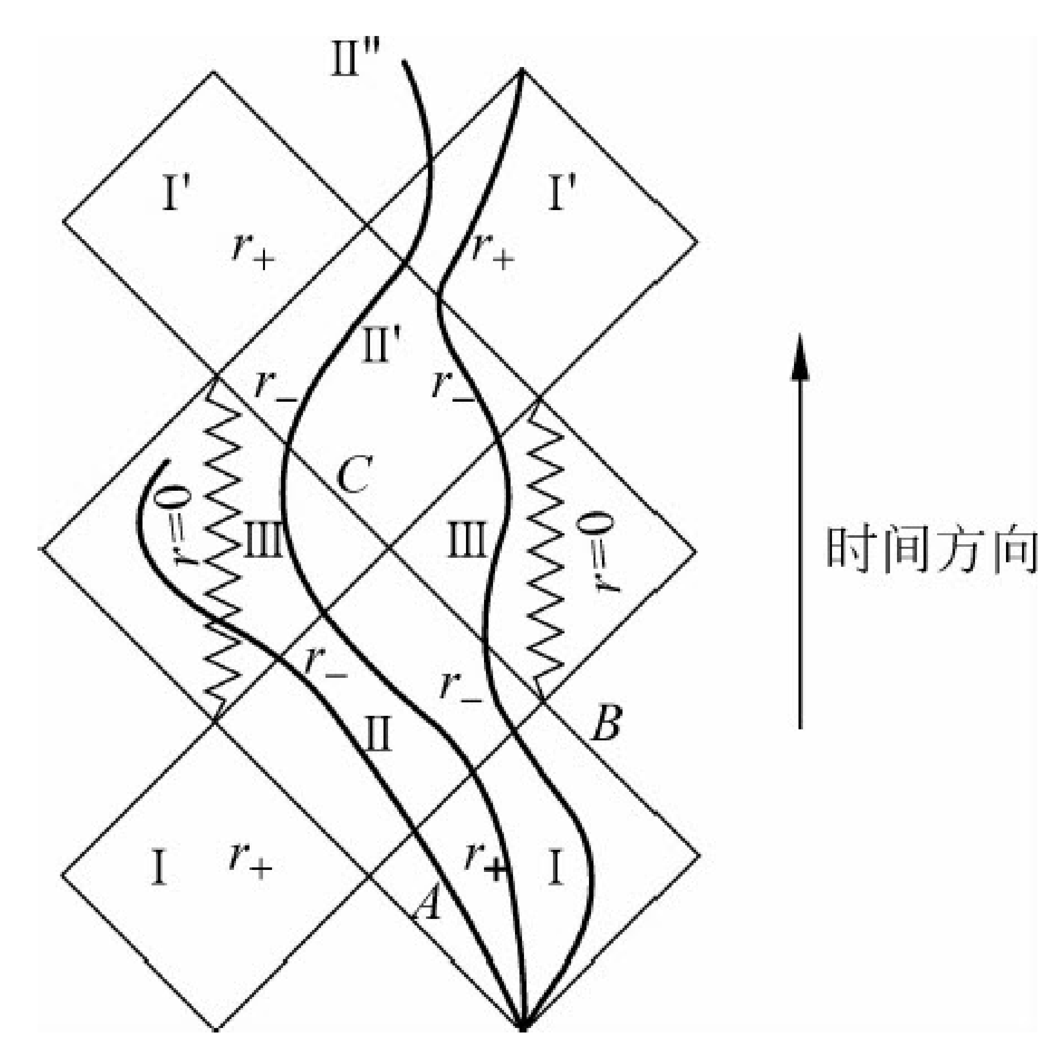


图5-4　克尔-纽曼时空的彭罗斯图

在前面讨论的史瓦西情况下，奇点r＝0附近，$g_{00}>0$，$g_{11}<0$，t是空间坐标，r是时间坐标。r＝常数的面是等时面，r＝0的“面”（即奇点）在彭罗斯图上应该与时间方向垂直，这种奇异性称为“类空奇异

性”，它将阻断所有进入黑洞的质点或光子的“前程”。这些粒子都将不可避免地撞在此类空奇点上。所有进入史瓦西黑洞的类时、类光世界线都将在r＝0的奇点处终止（参看图4-14）。

但是，克尔-纽曼黑洞与史瓦西黑洞不同，在r＝0附近，$\hat{g}_{00}<0$，$g_{11}>0$，t仍是时间坐标，r是空间坐标，等r面与时间方向平行，r＝0作为一个特殊的等r“面”当然也不例外。与时间走向平行的奇点（或奇环）称为“类时奇点（或奇环）”，所以克尔-纽曼黑洞的奇异性（包括克尔黑洞、克尔-纽曼黑洞的奇环和R-N黑洞的奇点）是类时的。类时奇点（或奇环）现在是竖直的，它不阻挡进入黑洞的光和质点的世界线，除非它们有意往奇点上撞。

进入克尔-纽曼黑洞的粒子，在穿过单向膜区Ⅱ，进入Ⅲ区后，还可从另一个区域Ⅱ′（白洞的单向膜区）中穿过，进入另一个宇宙Ⅰ′。在Ⅰ区看来，这个洞是黑洞，Ⅱ是黑洞的单向膜区，Ⅲ是黑洞的内部区。而在Ⅰ′区看来，Ⅱ′区是白洞的单向膜区，Ⅲ是白洞内部区。上述彭罗斯图往上、下方可无限延伸，从一个宇宙进入克尔-纽曼黑洞的飞船，有可能从另一个宇宙的白洞中冒出来。

这就是说，两个宇宙之间存在一个虫洞（隧道），黑洞是虫洞的入口，白洞是出口。也有可能Ⅰ和Ⅰ′是同一个宇宙，即虫洞的两个开口（白洞和黑洞）均在同一个宇宙中。

世界线A所示的观测者进入黑洞后，穿过奇环进入－∞＜r＜0的反引力宇宙，此宇宙没有视界，也没有无限红移面。但对于R-N黑洞，r＝0处是奇点，不是奇环，不存在反引力宇宙，此路不通，世界线在r＝0处终结。世界线B所示的观测者进入黑洞后，又从白洞出来，到达另一个引力宇宙，直到无穷远。世界线C所示的观测者，从黑洞进去白洞出

来，到达另一个宇宙后，又进入那个宇宙的一个黑洞。

不过，真实的黑洞可能不是这样。下面的宇宙监督假设告诉我们，黑洞内部的结构不稳定，稍加扰动，类时奇异性将倒在内视界r_-上，通道就会被阻断，使进入黑洞的飞船不可能从内部穿过，再从一个白洞钻出来，因此黑洞内部并不存在可穿越的时空隧道。

极端黑洞和裸奇异

从式（5.13）可以看出，当增加R-N黑洞的电荷时，r_+与r_-间的距离会缩小，也就是说单向膜区会变薄。当电荷增加到一定程度，使得$Q^2=M^2$时，将会有

$$r_+=r_-=M$$

也就是说，单向膜区缩成一个薄膜，这种黑洞称为极端黑洞，如果再增加一点电荷，则会有$Q^2>M^2$，这时r_+与r_-将会成为复数，这表示单向膜区消失了，奇点会裸露在外面，如图5-5所示。

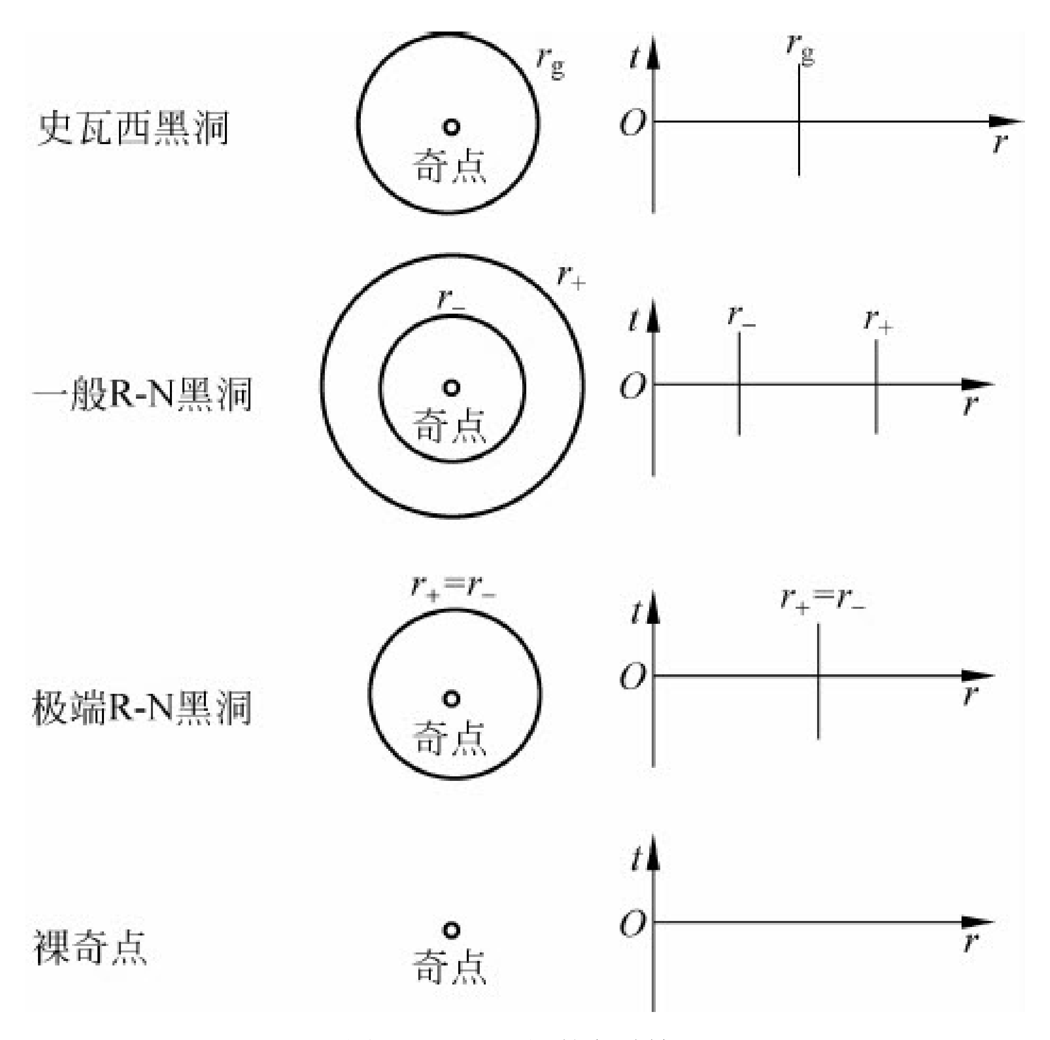


图5-5　R-N黑洞的各种情况

从式（5.15）则可看出，当增加克尔黑洞的角动量J时，r_+也会与r_-靠近，单向膜区也会变薄。当J增加到使$a^2=M^2$时，单向膜区也会缩成一个薄膜，$r_+=r_-=M$，克尔黑洞也会成为极端黑洞（图5-6）。这时如果再增加一点角动量，将会有$a^2>M^2$，单向膜区也会消失，于是奇环会裸露出来，成为裸奇环。我们把裸奇点和裸奇环统称为裸奇异（或裸奇点），如图5-7所示。注意，图5-7未画出无限红移面。

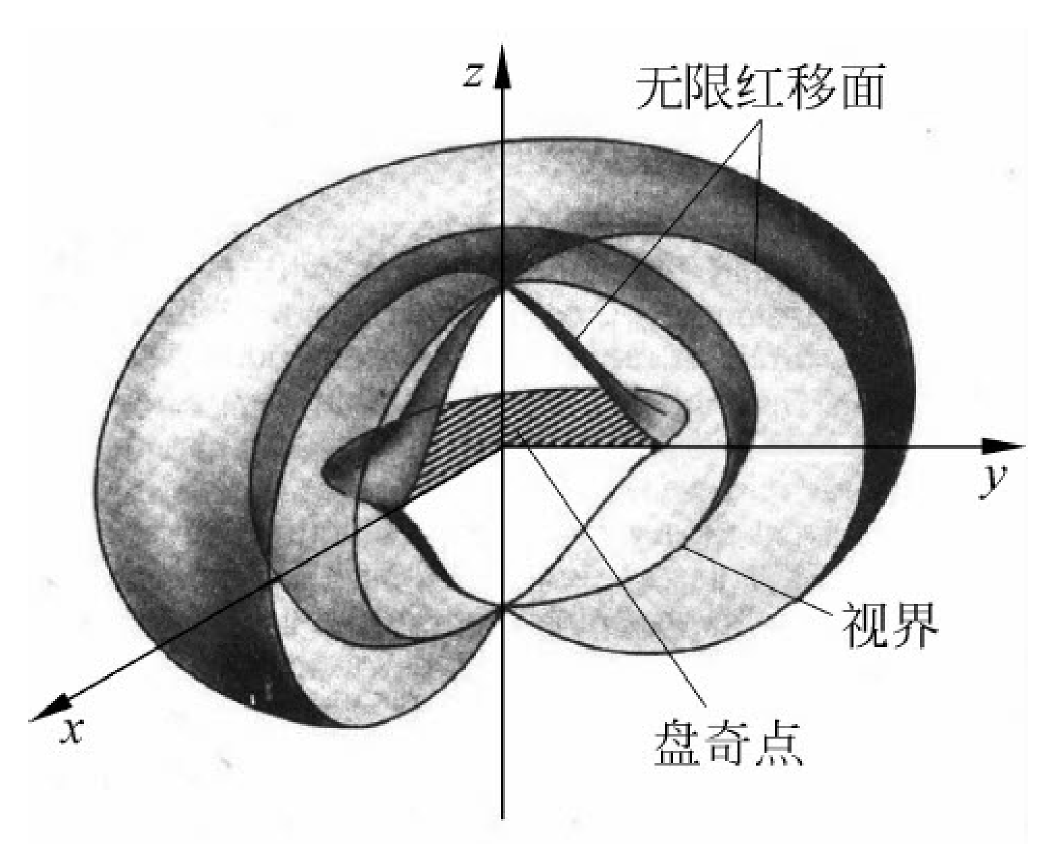


图5-6　极端克尔黑洞，内外视界合在一起

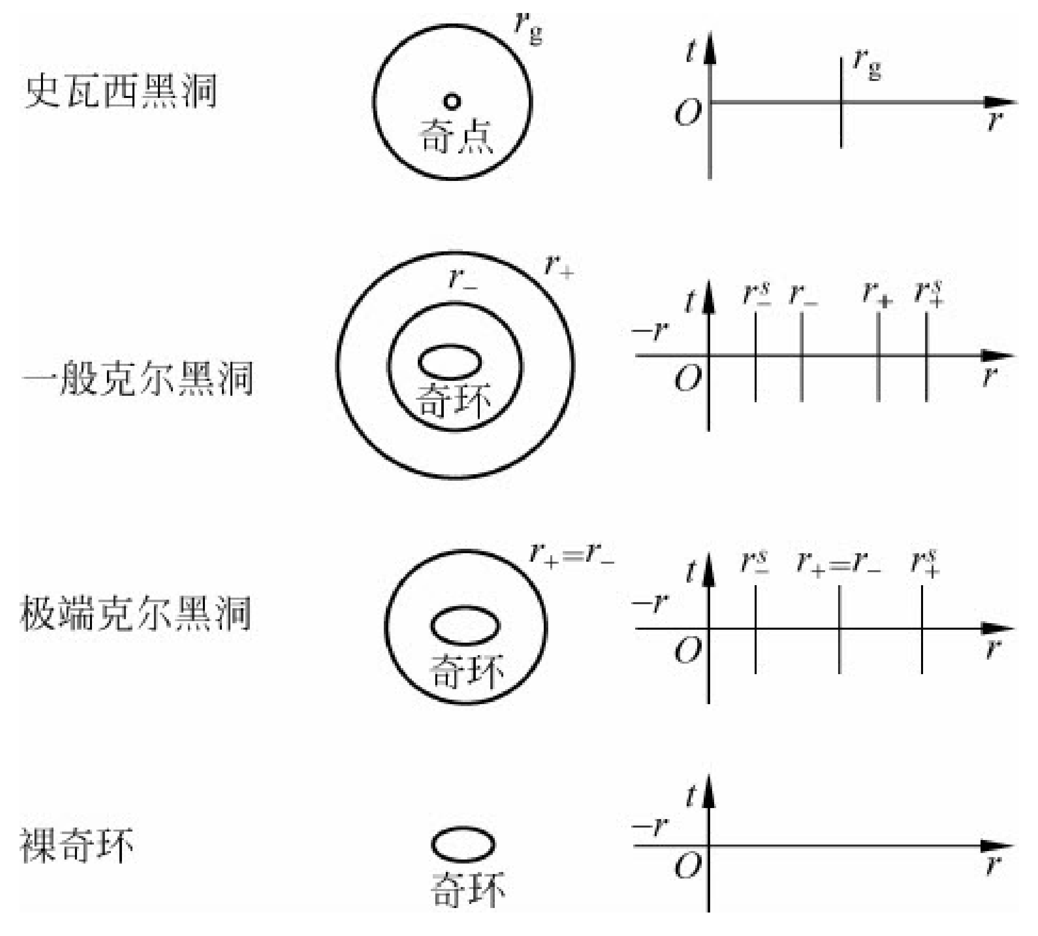


图5-7　克尔黑洞的各种情况

从式（5.10）也可看出，对于克尔-纽曼黑洞，如果增加电荷Q，或者增加角动量J，或者同时增加J和Q，都会使单向膜区变薄，当$a^2+Q^2=M^2$时，也会形成极端黑洞，这时单向膜区成为一层薄膜，再增加J或Q，同样可以使单向膜区消失，使奇环裸露出来，形成裸奇异。

宇宙监督假设

研究表明，奇点或奇环裸露出来是很不好的，会破坏事件的因果性。彭罗斯针对这一困难提出宇宙监督假设：

“存在一位宇宙监督，它禁止裸奇异的出现。”

提出这一假设，是和西方的文化传统有关的。欧洲的文化是继承和发展古希腊与古罗马的文明而来的。在古罗马的时候，城市里有一种监督官，他不许任何人不穿衣服在街上走。

彭罗斯觉得，为了保证时空中的因果性，宇宙也应该有一个“监督官”，他不许奇点和奇环不穿衣服裸露出来，这衣服就是黑洞的“视界”。由于视界的存在，黑洞外的人得不到任何来自黑洞内部的信息，当然也就看不见洞内的奇点和奇环，不会受它们的“不良影响”，因果性也就不会被破坏。

但是，这位宇宙监督是谁，彭罗斯没有说。这句话有点像大气压发现之前，有人提出的“自然害怕真空”一样，实际上没有给出问题的答案。

“宇宙监督”当然应该是一条自然定律，它可能是我们目前还不知道的什么定律，然而，自然界的基本定律不会太多，所以它更可能是一条我们已经知道的重要定律，只不过还没有把这条定律与“裸奇异”有机地联系起来。

从彭罗斯图5-4不难看出，进入克尔-纽曼黑洞，到达Ⅲ区或者Ⅱ′区的观测者，可以收到来自r＝0处（类时奇点或类时奇环）的信息。为了

防止进入黑洞的观测者看到奇点（以后把奇点和奇环统称为奇点），受到奇点的不良影响，彭罗斯又改进自己的“宇宙监督假设”，把它重新表述为

“类时奇异性是不稳定的。”

这是因为，研究表明，只要稍加扰动（例如有质点或飞船进入黑洞并抵达内视界附近），r＝0处的类时奇点就会倒下来，塌到内视界上，成为类光或类空奇点，阻断物体进入Ⅲ区的通道（图5-8）。感兴趣的读者可以参看有关的广义相对论书籍。

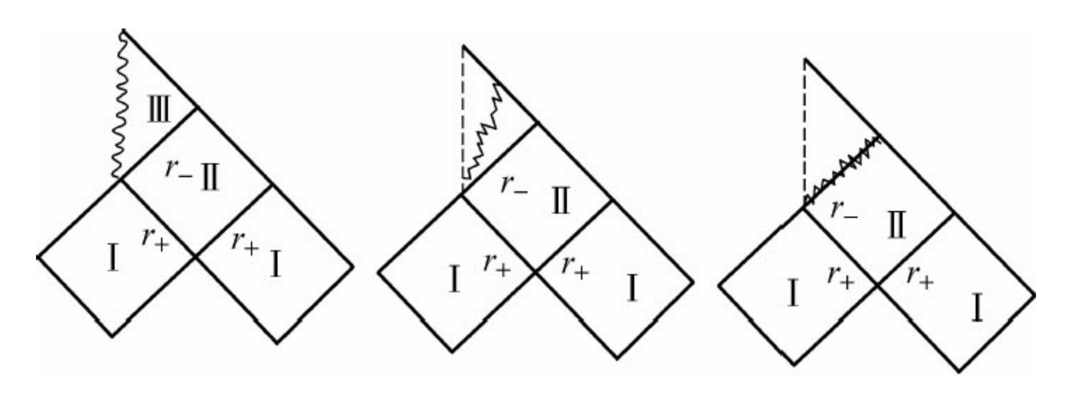


图5-8　不稳定的类时奇异性

无毛定理

研究认为，黑洞的边界是它的事件视界（简称为视界），外部观测者只能探知视界之外的事物，视界以内的任何物质和信息都跑不出来，外部观测者当然也就无法了解。

史瓦西黑洞的视界由它的总质量M决定。R-N黑洞的视界由它的总质量M和总电荷Q决定；克尔黑洞的视界由它的总质量M和总角动量J决定；克尔-纽曼黑洞的视界则由它的总质量M、总电荷Q和总角动量J共同决定。

研究表明，最一般的稳态黑洞（即不随时间变化的黑洞）就是克尔-纽曼黑洞。对于外部观测者，最多只能探知稳态黑洞的三个信息：总质量M、总电荷Q和总角动量J，其他任何信息都无从了解。

人们把黑洞的信息戏称为“毛”，提出一个无毛定理：对于外部观测者，黑洞失去了除总质量、总电荷、总角动量之外的全部信息。

黑洞是“无毛”的。实际上还有三根毛，即M、Q、J。如果是我们中国人提出这一定理，大概就要戏称为“三毛定理”了。

无毛定理告诉我们，黑洞是一颗“忘了本”的星，它忘记了自己的过去，忘记了自己的历史，忘记了自己是由什么化学成分、什么物质结构的材料，在什么时候，在什么条件下形成的。

对于外部观测者，几乎失去了形成黑洞的物质的全部信息。不过，信息并没有从宇宙中消失，它们只不过被锁在了黑洞的内部。

彭罗斯过程

数学家彭罗斯在物理学家斯亚玛的动员下，进入了相对论研究的领域。他对黑洞的奇点和能层都进行了研究并做出了重要贡献。

首先，他提出并证明了奇点定理：认为符合广义相对论的物理时空一定至少存在一个内禀奇点，即时空曲率是发散的，不能通过坐标变换消除的本性奇点。

彭罗斯还创造性地把时空奇点看作时间开始和终结的地方，认为一定存在时间有开始或结束的物理过程。正是这一革命性的思想，把霍金吸引到黑洞的研究领域。对于这方面的情况，本书下面会详细介绍。

现在我们来看彭罗斯的另一研究，他提出一种物理过程，可以从转动黑洞的能层中提取能量，这就是著名的彭罗斯过程。在此之前，人们把各种黑洞都默认为恒星演化的最后归宿，都看作是死亡了的恒星。彭罗斯的结论告诉我们，至少转动的黑洞还存在进一步的演化过程。

彭罗斯发现，与黑洞外部的普通时空不同，转动黑洞的能层中存在负能轨道。一块能量为E的物质进入能层后，如果在适当位置分裂成两块，其中一块恰好进入负能轨道，并穿过事件视界落入黑洞，能量为E_1。另一块飞出黑洞，能量为E_2。由于E_1为负，能量守恒定律告诉我们，必有E_2＞E。这等于说出射物体的能量大于了入射物体的能量，有黑洞的能量从这一过程中被提取出来。这就是彭罗斯过程（图5-9）。

研究表明，彭罗斯过程提取的能量是黑洞的转动能量，这部分能量原本储存在转动黑洞的能层中。在彭罗斯过程中伴随着能量提取出来的

还有黑洞的角动量。

这一过程使黑洞的转动逐渐变慢，能层逐渐变薄，最后转动停止，能层消失，克尔黑洞蜕变成史瓦西黑洞。如果是克尔-纽曼黑洞，则会退化成R-N黑洞，即带电史瓦西黑洞。

当然，如果黑洞和入射物体均带电，这一过程也有可能提取黑洞所带的电荷和电磁能。这时黑洞将向史瓦西黑洞蜕化。不过，彭罗斯过程的前提是黑洞要存在能层。

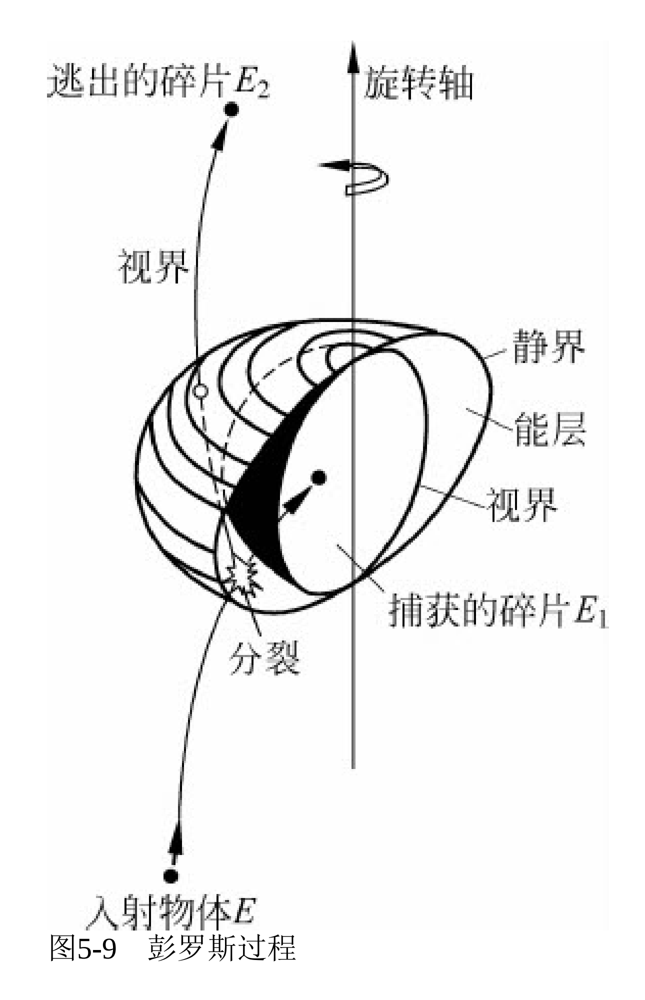


图5-9　彭罗斯过程

米斯纳超辐射

美国相对论专家米斯纳发展了彭罗斯的这一成果。他想到，如果入射物体很小，小到量子效应不能忽略，入射物体不就成了入射波吗？入射波是否也可以用来提取黑洞能量呢？他深入研究后果然发现，在一定的能量范围内，的确可以用入射到能层的波提取出黑洞的转动动能，也就是说，会有出射波能量大于入射波能量的现象出现，这一效应被称为米斯纳超辐射。形成超辐射的条件是入射粒子的静止质量μ要满足

$$m\Omega_{\mathrm{H}} + eV > \mu \tag{5.25}$$

式中，Ω_H和V分别是黑洞表面（即事件视界）的转动角速度及黑洞两极处的静电势，e为粒子所带电荷，m为入射粒子角动量在黑洞转动轴上的投影（类似于量子力学中的磁量子数）。

米斯纳超辐射是彭罗斯过程的量子表现。它提取的也是黑洞的转动动能和角动量。当然，如果粒子与黑洞都带电，也可以提取黑洞所带的电荷与电磁能。

对自发辐射的猜想

米斯纳对彭罗斯过程的发展，启发了苏联物理学家斯坦诺宾斯基和加拿大物理学家安鲁。他们想到，根据爱因斯坦的辐射理论，物质的辐射有两种，一种是自发辐射，另一种是受激辐射，这两种辐射的辐射系数之间有关联，存在受激辐射的物质，必定同时存在自发辐射。

超辐射本质上就是一种受激辐射。这样看来，转动或带电的黑洞似乎还应存在自发辐射，他们很快证实了自己的猜测。他们的研究结果被称为斯坦诺宾斯基-安鲁效应。

我们在介绍这一效应之前，需要先简单讲一下爱因斯坦的辐射理论。然后再简介一下相对论量子力学中的负能困难，以及有趣的狄拉克真空与反物质的概念。

爱因斯坦的辐射思想

爱因斯坦考虑原子中的两个能级，E_k和E'_k。如果有能量恰为二能级能量差的光量子

$$h\nu_{k'k} = E'_k - E_k \qquad (5.26)$$

射入，则处于低能级E_k的原子将吸收此辐射跃迁到高能级E'_k，这就是原子的吸收效应。如果有处于高能级E'_k的原子跃迁到低能级E_k，则会有$h\nu_{k'k}$的光量子射出，这就叫原子的辐射。

但是，爱因斯坦指出原子的辐射有两种，一种是自发辐射，另一种是受激辐射。所谓自发辐射，就是在没有外界干扰的情况下，处于高能级的原子会以一定的概率自发地跃迁到低能级，并放出能量为hνk′k的光量子，如图5-10所示。

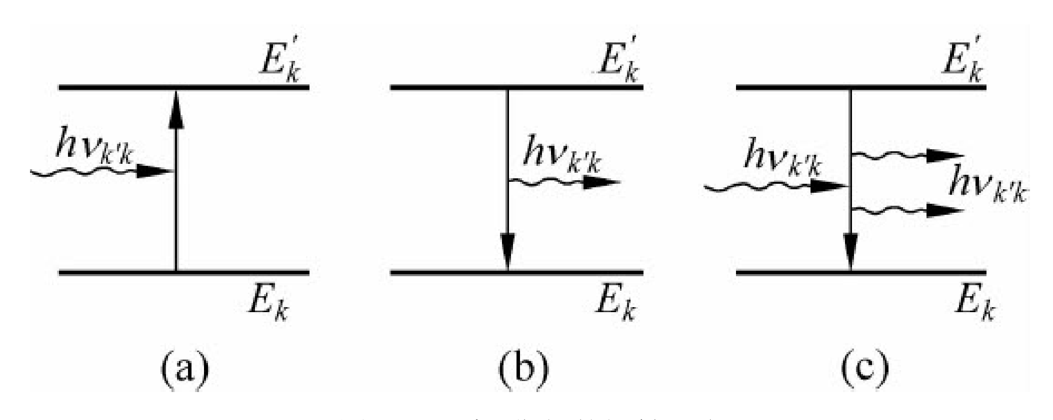


图5-10　爱因斯坦的辐射理论

（a）吸收；（b）自发辐射；（c）受激辐射

这是学过物理的人早就知道的，不过爱因斯坦指出还存在另一种辐射情况，当有能量恰为二能级能量差的光量子$h\nu_{k'k}$经过原子附近时，会

刺激处于高能级的原子，使它们一下子都跃迁到低能级，并放出同频率因而也同能量的光辐射，这就是所谓的受激辐射。提出“受激辐射”这一概念，是爱因斯坦的又一创举。

今天的激光理论和激光器，就建立在爱因斯坦提出的受激辐射理论的基础上。不过当年的爱因斯坦没有想到受激辐射会有这么大的应用价值。

激光的特点

由于受激辐射产生的光量子，与入射光量子同频率、同偏振、同相位、同方向，而且可以形成强脉冲，这就使激光器能够获得强大且单色性、平行性均非常好的光能，因而具有广泛的用途。

为了形成很强的光脉冲，可以使用光和电等方法，把处于低能级的原子大量激发到高能级，形成处于高能级的原子远远多于低能级原子的状态，即所谓“粒子数反转”的状态。这时如果有一个能量为$h\nu_{k'k}$的光子射入，处于高能级的原子就会同时产生受激辐射，一瞬间像雪崩一样射出大量同频率、同偏振、同相位、同方向的光子，这就是著名的激光。

激光的特点是能量集中，首先是能量在频率上集中、且偏振方向一致、相位一致，因而单色性好、相干性好；其次是能量在空间上，也即在方向上集中，平行性好；第三是能量在时间上集中，可形成强脉冲。所以激光具有强大的功率和良好的相干性，因而在科研、军事和工业上有重要用途。

为了说明转动、带电黑洞附近粒子的自发辐射，我们先介绍一下有趣的狄拉克真空与反物质。

负能困难

我们现在讲一下相对论性量子力学中的负能困难。大家都知道，一个粒子的相对论能量E和动量p的关系是

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (5.27)$$

式中m_0是粒子的静止质量。上式不同于非相对论粒子的能量动量关系

$$E = \frac{p^2}{2m} + V \quad (5.28)$$

式中V是势能。把式（5.27）开方，可得粒子能量为

$$E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} \quad (5.29)$$

我们看到，在相对论情况下，不但有正能粒子，而且有负能粒子。可是谁见过负能粒子呢？谁也没有见过。而且，粒子的负能量可以非常负，能量似乎没有下限。按照式（5.29）可以画出相对论性粒子的能级图。

从图5-11可以看出，粒子的负能量没有下限。从图中还可以看出，存在能量最低的正能粒子态，那就是动量p为零的静止正能粒子，$E = m_0c^2$。同时，还存在最高的负能粒子态，那就是p为零的静止负能粒子，$E = -m_0c^2$。在$E = \pm m_0c^2$之间是禁区，不存在能量介于$+m_0c^2$和$-m_0c^2$之间的粒子。

这一能级分布图告诉我们，正能粒子是不稳定的，因为量子效应使

得它可以通过跃迁飞过禁区进入负能态，同时放出能量，例如辐射出光量子。这一过程类似于原子中的能级跃迁（轨道间的跃迁）。

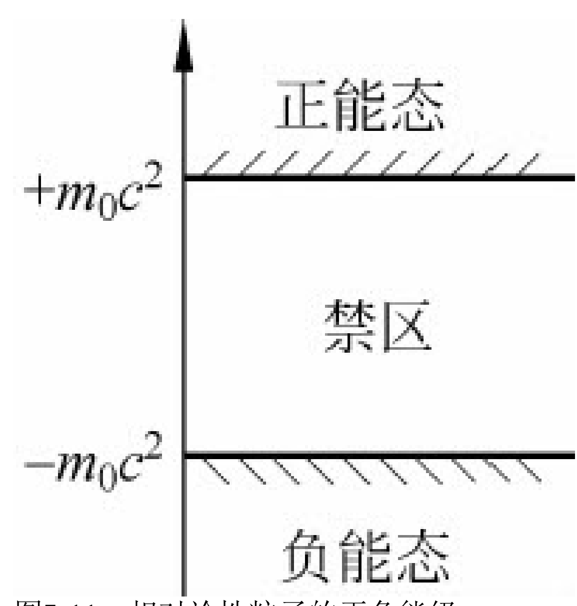


图5-11　相对论性粒子的正负能级

在玻尔原子模型中，电子只能存在于各个量子化的轨道（能级）上，各轨道之间的区域（即各能级之间的能态）电子是不能占据的，类似于图5-11中的禁区。然而，电子可以从高能轨道跳过“禁区”跃迁到低能轨道，同时射出光量子。

上面的能级图告诉我们，正能粒子可以跳过禁区跃入负能态，而处于负能态的粒子还可以进入更负的能态，同时放出能量。这一过程可以没有止境，粒子可以不断地、无限制地往更低的负能态跑，同时无限制地放出正能量。可是这一现象谁也没有看到过，这是怎么回事呢？

狄拉克真空

狄拉克提出了一个革命性的思想：真空不空。他认为，什么是真空呢？真空就是能量最低的状态。一个正能粒子都没有的状态是不是就是能量最低的状态呢，他认为不是。

可以打一个比方，一分钱都没有的人还不是最穷的人，因为还有欠债的人呢。欠债越多的人越穷，如果一个人一分钱都没有，并且欠债欠到最多，他把可以借钱的所有地方都借遍了，而且都借到了可能借到的最大值，他才是一个最穷的人。

同样，对于作为能量最低状态的真空，不仅应该一个正能粒子没有，而且应该所有的负能态都填满。所以，狄拉克认为，真空态就是正能态全部空着，而负能态全部填满的状态。

他认为不同粒子有不同的真空，例如电子真空、质子真空，等等。他以电子真空为例来说明自己的真空思想。

我们把图5-11看成电子的能级图。电子真空就是所有正能态都空着（一个正能电子都不存在），而且所有负能态都被电子填满的状态。泡利不相容原理要求一个状态只能存在一个电子，由于负能态都已填满，所以即使存在正能电子，这个正能电子也就只能永远处于正能态，不可能跃过禁区进入负能态，当然也不存在负能粒子落向更负能态的可能性。所以，狄拉克真空是稳定的，也是不空的。

打击真空

怎么证明狄拉克的真空图像是正确的呢？狄拉克说，我们可以打击真空，通过打击，赋予处于负能态的电子能量，使它们跃迁到正能态（图5-12）。这样就可以从真空中打出正能电子，同时留下一个负能空穴。由于电荷守恒，新生的正能电子带负电，所以负能空穴应该带正电。

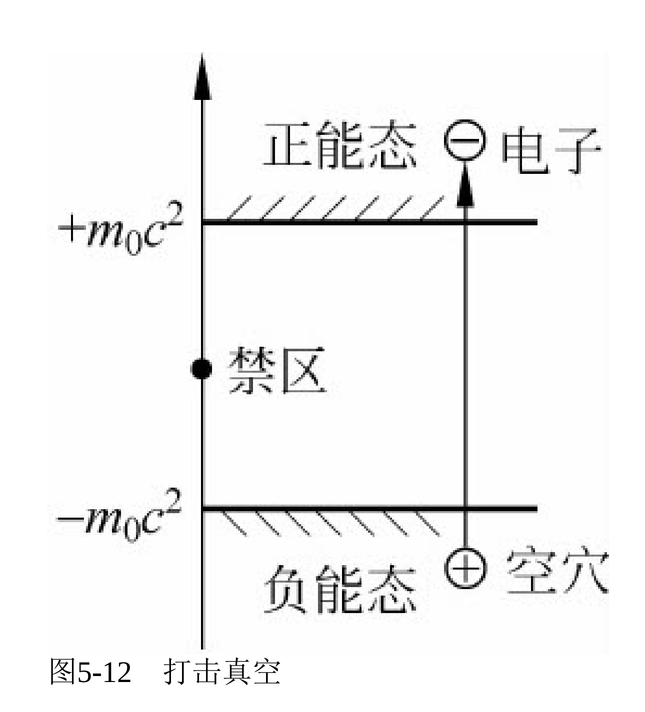


图5-12　打击真空

狄拉克最初猜测“负能空穴”也许是质子？因为当时学术界知道的带正电的粒子主要是质子。后来，很快弄清楚了，负能空穴不可能是质子。

因为把一个具有E＝－m_0c^2的电子打到正能态，变成E＝m_0c^2的正能电子，需要使这个电子跃迁过禁区，而禁区宽度是$2m_0c^2$，所以外界必须提供给这个跃迁电子$2m_0c^2$的能量。但跃迁完成后，生成的电子只具有m_0c^2的能量，另一部分m_0c^2的能量哪里去了呢？能量必须守恒，由于真空的其他部分都没有变化，只是多了个“负能空穴”，自然的想法是，“负能空穴”具有了m_0c^2的能量。所以，负能空穴是一个正能的粒子，由于它的质量与电子相同，但带正电荷，所以被称为“正电子”。于是狄拉克预言了正电子的存在。

狄拉克说，如果我的理论是正确的，应该能够从真空中打出正负电

子对。他认为，可以把原子核看作铁砧，重粒子看作铁锤，真空就夹在“铁砧”和“铁锤”之间。用铁锤（重粒子）打击夹在锤和砧之间的真空，即用重粒子轰击原子核，就可以从夹在二者之间的真空中打出正负电子对（即正能电子和具有正能的“负能空穴”）。

赵忠尧的贡献

1929年，中国旅美物理学家赵忠尧首先在实验中观测到了正负电子对的产生。1930年，他又观测到了正负电子对的湮灭。赵忠尧先生对正电子的发现作出了重大贡献。

遗憾的是，当时他头脑中没有“正电子”的概念。他把正电子的轨迹当成了反向运动的电子的轨迹。而且，当时还出现了几个与他的工作相矛盾的实验，那些实验似乎表明赵先生的实验有误。

然而，事实恰好相反。后来的实验表明，那些不利于赵先生的实验都是错的，只有赵先生的实验是正确的。遗憾的是，时机已经错过，本该获得诺贝尔奖的赵忠尧先生与这一大奖失之交臂，发现正电子的诺贝尔奖不恰当地只给了安德逊一个人。

安德逊在研究宇宙线轰击原子核时，打出了正负电子对。当时认为，这就是作为“铁锤”的宇宙线粒子，打在作为“铁砧”的原子核上，从夹在“锤”和“砧”之间的真空中打出了电子对。不过，进一步的研究表明，正负电子对并非宇宙线直接轰击原子核得到的，而是宇宙线在穿过空气时，撞在空气中的粒子上产生了γ射线，γ射线再撞在原子核上，在这一撞击过程中γ射线（即光子）生成了正负电子对（图5-13）。

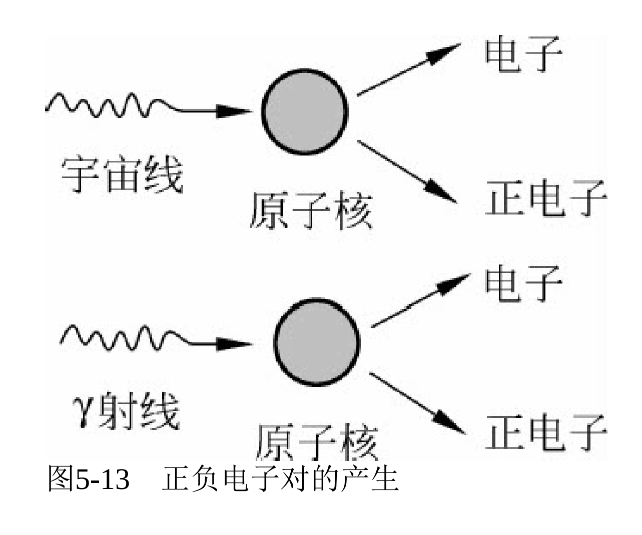


图5-13　正负电子对的产生

反物质

正电子发现之后，人们又发现了反质子，即“负能质子的空穴”。反质子与质子质量相同，但是带负电荷。反质子与正电子一起，可以构成“反氢”原子。“反氢”是反物质的一种。

所谓反物质，其原子核带负电，由反质子和反中子组成（反中子与中子相似，但是磁矩相反），正电子围绕着“反核”转动。值得注意的是，反物质和通常的物质一样，质量和能量都是正的。

王淦昌的贡献

我们中国人对基本粒子研究作出的另一个大贡献是王淦昌先生发现了反西格玛负超子。他是在苏联杜布纳联合核子研究所作出这一发现的，这个研究所是苏联、中国等12个社会主义国家合作组建的。

观察到反西格玛负超子的丙烷气泡室是王淦昌先生设计的，这一设计是完成此项发现的关键一步。

杜布纳联合核子研究所只发现了这一种基本粒子，王淦昌先生功不可没。

赵忠尧和王淦昌先生早年就放弃了国外优越的实验条件和优裕的生活条件，回到贫穷、落后的祖国，为中国核物理和粒子物理的发展做出了重大贡献，培养了大批人才。

转动、带电黑洞视界附近的狄拉克能级

研究表明，转动和带电的黑洞，会使视界附近的狄拉克能级发生变化，如图5-14所示。

从图5-14可以看出，狄拉克能级在这类黑洞的表面（视界）附近会“提升”，其中一部分负能级（图中交叉线表示的阴影部分）的高度会高于邻近的正能级。按照狄拉克真空的思想，这部分负能级是充满电子的，而禁区右上方的正能级是空着的，所以阴影部分右方的禁区好像是一个势垒，研究表明，阴影区的电子会通过隧道效应穿过这一“势垒”，到达右方的区域成为正能电子。

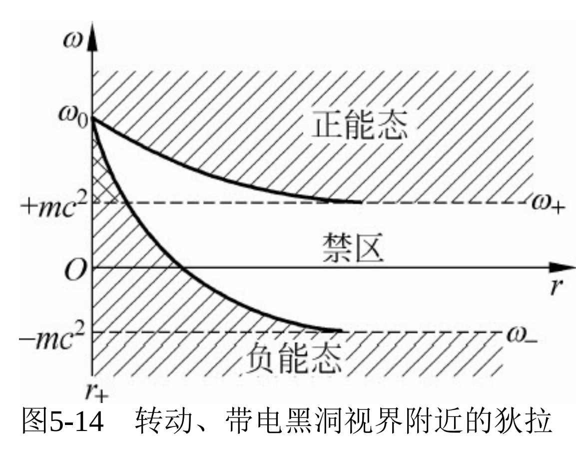


图5-14　转动、带电黑洞视界附近的狄拉克能级

这就是黑洞的自发辐射，它会带出黑洞的转动能、角动量、电磁能和电荷。使转动带电的黑洞蜕化为不转动、不带电的史瓦西黑洞。这时，黑洞附近的狄拉克真空能级将蜕化成图5-15的样子。

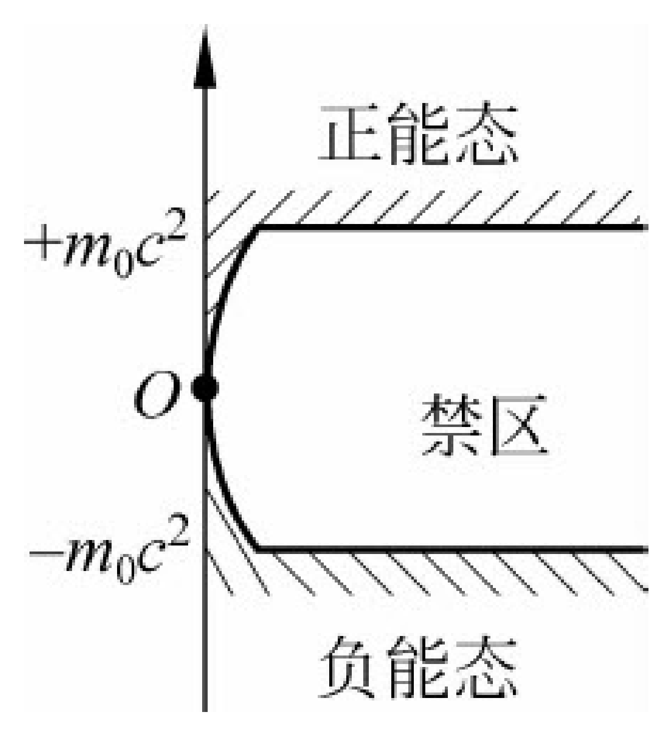


图5-15　史瓦西黑洞视界附近的狄拉克能级

我们看到，转动和带电的黑洞还是有生命力的。它们存在彭罗斯过程，以及自发辐射和超辐射。转动带电的黑洞好像是黑洞的激发态，史瓦西黑洞则好像是黑洞的基态。当各种黑洞蜕化为史瓦西黑洞之后，黑洞似乎终于真的成了死亡的星，成了恒星的最后归宿。



绘画：张京

第六章　探索黑洞的明星——霍金

现在来介绍黑洞研究中的一颗明星——霍金（图6-1）。

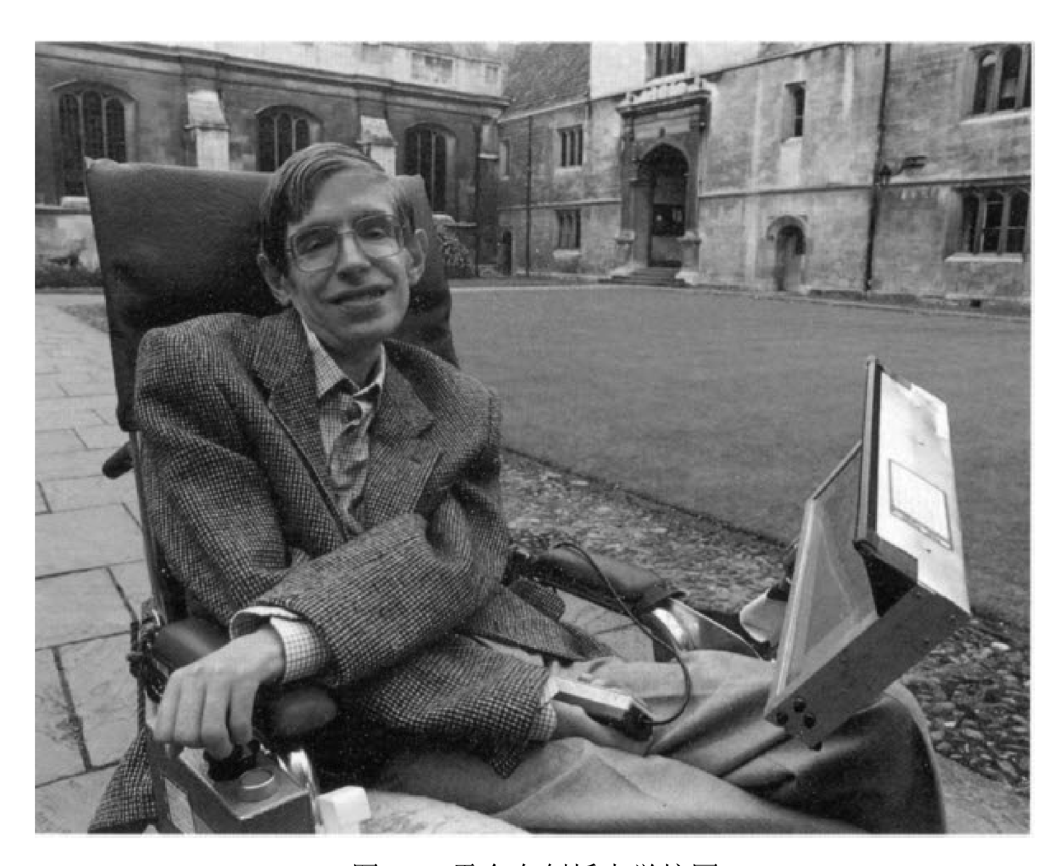


图6-1　霍金在剑桥大学校园

少年霍金

霍金1942年1月8日出生于英国的牛津，这一天正是伽利略逝世300周年的纪念日。霍金经常跟人提起："我是在伽利略逝世300周年的那一天出生的。"似乎在提醒人们，你们看我像不像伽利略再世？不过，他同时也说，其实在那一天出生的孩子有20万。

他出生在牛津，并非他的家在牛津。当时"二战"正在进行，为了不损毁英国的文化中心，德国飞机不炸牛津和剑桥，作为回报，英国飞机也不炸德国的哥丁根和海德堡。

霍金的父母都毕业于牛津大学。父亲搞生物医学。他出身贫寒，很注意节俭，但对别人很慷慨。母亲学文科，长期做文秘工作。她年轻时是英国共青团的团员，后来转入了比较温和的工党。她经常带着年幼的霍金参加群众集会和游行，对少年霍金产生了较大影响。

由于家境不富裕，上不起私立的贵族子弟学校，少年霍金上的是普通中学，还曾在一个女子学校上过学，那所学校接收幼年的男生。

霍金上学时正在搞教改，把学校分成学术性和非学术性两种，在学术性学校中又把学生按成绩好坏分在不同的班。他所在的年级分为A、B、C三个班。成绩最好的在A班，中等的在B班，差的在C班。每学年三个班的学生进行调整。A班20名之后的学生要降到B班，B班的前20名升到A班。B班和C班也做类似的调整。

霍金第一学期考了第24名，第二学期考了第23名，幸亏有个第三学期，他考了第18名，才没有降到B班。霍金本人对这种教学方式很不赞同，认为对那些降下去的同学打击太大了，自信心受到很大损害。老子

《道德经》中有一句话“大器晚成”，在中国古代颇有影响。这种教学方式显然不利于大器晚成的人。

霍金不是班上最拔尖的学生，同学们感觉他的实际水平在第10名左右。不过，他经常看课外书，知识面较宽，爱独立思考，喜欢与同学们交流。诸如“宇宙的起源需不需要上帝帮忙啊？”“远方星系的红移是否由于光线在旅程中走得太累了，从而变红啊。”

他成绩一般，字也写得不好，老师并不怎么看好他，但似乎同学们看出了什么苗头，给他起了个外号叫“爱因斯坦”。结果这个绰号叫发了，他后来真的被誉为“当代的爱因斯坦”。

中学时他并不喜欢物理课，觉得简单而枯燥。他认为化学就有意思多了，经常会发生一些意想不到的事情，例如爆炸啦，起火啦，等等。

考大学时，父母希望他学医，将来当医生。医生救死扶伤，是个受人尊敬的职业，而且在西方收入也不错。但是他在高中时受到一位老师的影响，对物理产生了兴趣。觉得物理研究的问题，小至基本粒子，大至整个宇宙，有趣而高深，让人觉得神秘莫测。于是他报考了牛津大学的物理系。由于紧张，考前有点失眠，但发榜时还是考上了。

在牛津的大学生涯

当时英国的大学也在搞教改。学生只在刚入学时考一次试，然后就不考了，只在毕业前再考一次，用4天时间上下午连续考，把三年学习的内容统考一遍。由于学校的平时管理放得很松，学生们相当自由。霍金喜欢玩，尤其喜欢划船，结果用到学习上的时间就很少，霍金后来回忆，觉得自己大学期间每天的学习时间平均只有一小时。

有一次上电磁学课，老师布置大家看课本的某一章，并把这章后面的13道题都做了，然后就宣布下课，两个星期后再见。下课后，霍金一直在玩，直到两周后交作业的前一天，才想起自己还没有做作业。那天早晨，同学们又约他去玩，他说不行了，必须赶紧补作业。那几个同学暗想：你今天才想起做作业，你知道这题有多难吗？你试试吧。他们几个人努力了两个星期，每人才做出一两道题。中午，这些同学返回宿舍时，正好碰到霍金下楼去吃饭，于是问他："题做得怎么样了？"他说："这题真难，我没来得及做完，只做了10道。"

疾病来袭——人生的转折

霍金人生的转折发生在大学毕业的前一年。他有一次系鞋带时突然发现手不灵活了。英国的医学很先进，很快确诊他患了进行性肌肉萎缩。这是一种不治之症，肌肉萎缩会不断加重，人逐渐走向全身瘫痪，医生预言他最多还能活两年。“哎哟！年轻人怎么得了这种病？吃点好的吧。”

霍金心情十分沮丧，自己的青春才刚刚开始，没想到生命马上就要结束了。他买了一些啤酒，在宿舍中一个人独饮。最初他什么事也干不下去，头脑中一片空白，这时他的女友安慰他，表示尽管他有病，自己还是要嫁给他，这给了霍金很大的鼓舞（图6-2）。


图6-2　霍金夫妇结婚时的照片

他想，反正一时半会儿还死不了，而且既然要结婚，就要准备过日子，将来就要有职业。首先要有一个博士学位，所以自己还是应该努力，不然怎么求职？怎么养家？

于是他生平第一次开始努力学习。在勤奋的学习中他发现自己挺喜欢也挺适合科学研究的，而且在学习和研究中享受到很大的乐趣。他不禁想起了有人说过的一句俏皮话：“科学家和妓女都从自己喜爱的职业中获得了报酬。”

大学本科毕业时，同宿舍的4个人都报考了研究生。笔试结束后霍金和另外两个同学觉得沮丧，只有一个同学觉得考得不错。成绩公布时，除去那位觉得考得不错的同学感到失望之外，他们三人倒都比预想的要好。

口试时霍金已经拄着拐杖。考试委员会问他想去剑桥还是留在牛津。霍金回答说，你们要是成绩给我一等，我就去剑桥；要是给我二等，我就留在牛津。结果考试委员会给了他一等，于是他就去了剑桥。

霍金原本对粒子物理有兴趣，但那时的粒子物理重点是研究粒子分类和对称性，弱电统一理论和量子色动力学都还没有出现，他觉得这方面的研究有点与植物学分类类似，没有较为成熟的理论，看不出有什么前景，于是兴趣就转向了理论天体物理和宇宙学，因为那个领域有一个成熟的理论可用，那就是爱因斯坦的广义相对论。

霍伊尔与斯亚玛

霍金去剑桥是想追随著名的霍伊尔教授研究宇宙演化理论。我们在第二章中谈到，霍伊尔曾对恒星的聚变反应理论作出过重大贡献。这里我们要讲到他的另一重大成果，他是稳恒态宇宙模型的创始人。稳恒态宇宙模型与大爆炸模型不同，认为不存在原始火球。宇宙在膨胀过程中不断有物质从真空中产生，宇宙演化中物质的密度和温度都没有大的变化。

大爆炸宇宙模型原本称为火球模型。这一模型认为宇宙起源于一个原始的核火球，物质从核火球中创生出来，在宇宙膨胀过程中不再有物质从真空中产生，宇宙中物质的密度和温度都随着膨胀而减小。火球模型是由俄裔物理学家伽莫夫提出的。

霍伊尔坚决反对这一模型，认为这个原始火球无异于一场大爆炸，于是讥讽它为大爆炸模型，后来"大爆炸模型"这个称号就流传下来了。

霍金原想追随霍伊尔学习，没想到霍伊尔不要他。当时剑桥还有一位研究广义相对论和宇宙学的老师，叫斯亚玛。斯亚玛是谁？霍金从来没有听说过。霍伊尔不要他，霍金没有办法，只好去找斯亚玛，斯亚玛接收了他。

斯亚玛以不主动管学生著称。你要来当我的学生，可以，但我不给你找科研题目，你自己找。如果你不来找我，我不会主动去管你，你毕不了业自己负责。你如果来找我，问我问题，我可以跟你讨论，可能建议你去找某个人，或去看某本书、某篇论文。

笔者听说斯亚玛这种带博士生的方式时，觉得这个导师太不负责任

了，简直不合格啊。后来了解到，当时世界上的几个最优秀的青年相对论天体物理学家中，几乎有一半出自斯亚玛的门下，笔者才意识到自己最初看法的错误。

博士生确实应该像斯亚玛那样带，对待博士生不应该像硕士生那样。因为硕士生一般没有参加过科研，老师给他题目，领他入门，并帮助他前进是可以的，让他从研究中学会研究。而博士是高级人才，应该具有自主科研的能力，应该学会自己找题目，自己攻关，老师最多辅助一下，这样才能成长为合格的博士。

斯亚玛还有一个优点，经常在自己办公室待着，学生很容易找到他。霍伊尔则不同，整天在外边奔走，学生很难找到他。

初露锋芒：与霍伊尔的争论

一开始，霍金没有课题，脑子里还在想着霍伊尔的研究领域。他就经常到霍伊尔的研究生纳里卡的办公室去。国外的研究生都是一个人一间或两个人一间办公室，里面每人一张桌子，一把椅子，一个书架。办公室里通常还有一块黑板，一个电话。纳里卡是一个人一间办公室。

霍金进去后看见纳里卡正在计算着什么。就问他，你在算什么呢？原来是搞霍伊尔建议他做的题目。霍金说：我帮你算好吗？纳里卡说，当然好了。于是霍金就帮他计算。在研究过程中，霍金发现霍伊尔的新理论中有个致命错误：其中的一个系数实际上是无穷大！大家知道，系数只能是有限值，既不能是零，也不能是无穷大。霍金反复论证后，觉得这个系数肯定是无穷大。

不久，霍伊尔在伦敦的一次学术会议上报告他的这一工作，他还不知道霍金已经发现了他的新理论的错误。做完报告后，霍伊尔严肃地扫视了一下会场上的100多位听众，问："有没有问题？"

这时坐在最后一排的霍金拄着拐杖站了起来，说："我有一个问题。"霍伊尔问："什么问题？"霍金说："你报告中的那个系数是无穷大。"霍伊尔说："不是无穷大。"霍金说："是无穷大。"听众中传出一阵令霍伊尔难堪的笑声。霍伊尔明白，如果霍金说的问题确实存在，自己的工作就全错了。于是他板起面孔问："你怎么知道？"霍金说："我论证过。"会场上又出现笑声，霍伊尔恼羞成怒。

霍伊尔认为霍金是不道德的，既然发现了我论文的错误，为什么不事前在会下提出，要到会上来让我出丑。霍金和其他一些年轻人则认

为，真正不道德的是霍伊尔教授本人，为什么把不成熟的工作拿到大会上做报告？霍金挑出的这个重要失误，使霍伊尔企图改进稳恒态理论的新模型泡了汤。

那段时期的天文观测对稳恒态理论不利，特别是发现了3K微波背景辐射，科学家们很快确认那就是一直在寻找的宇宙大爆炸的余热。这一发现极大地支持了大爆炸模型，稳恒态宇宙模型遭到重大挫折，从此，大爆炸理论成为宇宙演化的主流理论。

幸会彭罗斯

斯亚玛对霍金的研究能力非常赞赏，他介绍霍金认识了数学家彭罗斯。彭罗斯是在斯亚玛的劝说下进入相对论研究领域的，这时他刚刚做了一件重要工作，提出了“奇点定理”。彭罗斯证明，按照广义相对论，在弯曲时空（即万有引力）作用下的塌缩星体，不仅有可能形成黑洞，而且形成黑洞后所有的物质都要会聚到黑洞的中心，在那里形成物质密度和时空曲率为无穷大的奇点。

彭罗斯创造性地对奇点作了重新认识，认为奇点就是时间开始或结束的地方，黑洞内部有个时间的终点，白洞内部有个时间的起点。彭罗斯的奇点定理说，只要时空的因果性良好，广义相对论正确，而且有一点物质，黑洞情况的时间演化就一定有一个终结，也就是说黑洞内部一定会存在时间的终点——奇点。

霍金原本不熟悉彭罗斯使用的现代微分几何（即整体微分几何），但他对彭罗斯的奇点定理大感兴趣，而且猜想到彭罗斯的结论也许可以适用于宇宙演化。于是他开始学习使用这种几何，并努力把它应用于宇宙演化。

经过努力霍金终于证明大爆炸宇宙必定有一个初始奇点（时间开始的时刻），大塌缩宇宙则必定有一个终结奇点（时间结束的时刻），把彭罗斯的奇点定理推广到了宇宙学情况。不过，他的第一篇论文后来查出有缺陷，发现后，终于进一步给出了正确而严格的证明。

霍金后来的博士论文的前一半，就是论述霍伊尔模型的错误。后一半则是发展彭罗斯的奇点定理。他如愿以偿地获得了博士学位，他的科

研能力也得到斯亚玛和彭罗斯等专家的高度评价。

面积定理

1970年的一天，霍金正要上床睡觉，突然想到他和彭罗斯建立的证明奇点定理的方法，有可能用于研究黑洞的变化和碰撞，他立刻认识到黑洞的表面积A随着时间的发展，只能增大，不能减少。这就是所谓的“面积定理”：

$$dA \geqslant 0 \tag{6.1}$$

按照这个定理，两个黑洞可以合并成一个，但一个黑洞绝不可能分裂成两个。而且，通过两个黑洞合并前后的质量变化，可以计算出黑洞碰撞能放出多大能量。当时霍金的心情非常激动，简直彻夜难眠。第二天他仔细地完成了这篇研究论文。

贝肯斯坦的大胆创新：黑洞有熵和热

霍金的面积定理引起了美国一位年轻的研究生贝肯斯坦的极大兴趣。贝肯斯坦想，怎么会出现这样一条定理呢？黑洞的表面积为什么只能增加不能减少呢？太奇怪了。他突然想到热力学中的熵，按照热力学第二定律，孤立系统（或绝热系统）中的熵只能增加不能减少。黑洞的表面积与熵有点类似，黑洞的表面积会不会就是黑洞的熵呢？

贝肯斯坦把自己的想法告诉了老师惠勒教授。惠勒是当时世界上最优秀的相对论专家，他曾经参加过美国的氢弹研制，后来转入相对论研究。惠勒非常欣赏贝肯斯坦的猜想，自己的学生也许是对的，这可是个重要发现。于是他和贝肯斯坦抓住这一问题进行了讨论。

在讨论中，惠勒讲，假如你手中拿着一杯热水，它有温度也有熵。如果这时恰好有一个黑洞从你身边飘过，你把这杯水扔进黑洞，由于我们不能从黑洞中提取任何物质信息，那么这杯热水连同它携带的熵都从我们身边消失了，自然界中的熵不就减少了吗？这可是违背热力学第二定律的啊！

贝肯斯坦答道，这杯水扔进黑洞后，黑洞的质量增加，它的表面积也随之增加，热水的熵虽然消失了，黑洞的面积熵却增加了。这个思想实验正好支持了黑洞表面积本质上是“黑洞熵”的猜想，如果这一猜想正确，热力学第二定律就不会被破坏了。他们非常高兴，看来黑洞的表面积确实是熵。

贝肯斯坦-斯马尔公式

在热力学中，熵与温度是成对的物理量，黑洞既然有熵，似乎也应该有温度。黑洞真的有温度吗？答案是肯定的。

贝肯斯坦和另一位学者斯马尔在研究黑洞的几个参量的函数关系时，分别得到了一个积分公式

$$M=\frac{\kappa}{4\pi}A+2\Omega J+VQ \qquad (6.2)$$

和一个微分公式

$$\mathrm{d}M=\frac{\kappa}{8\pi}\mathrm{d}A+\Omega\mathrm{d}J+V\mathrm{d}Q \qquad (6.3)$$

式中，A为黑洞表面积；κ为黑洞表面引力，粗略地说它就是单位质量的质点静置于黑洞表面（视界）上时所受的引力；Ω、J分别为黑洞视界的转动角速度与黑洞的角动量；V、Q分别为黑洞两极处的静电势和黑洞所带的电荷；M为黑洞质量，由于采用了自然单位制，c＝1，M也就是黑洞的能量。

积分公式又称斯马尔公式，微分公式又称贝肯斯坦公式。把积分公式两端微分就可得到微分公式，读者不妨试一下。不过要注意，式（6.2）中的M、κ、A、Ω、J、V、Q均是变量，要同时对这7个量微分，才能从式（6.2）导出式（6.3）。

贝肯斯坦把微分公式和热力学第一定律比较，

$$\mathrm{d}U=T\mathrm{d}S-p\mathrm{d}V \qquad (6.4)$$

认为既然黑洞表面积A相当于熵，那么表面引力κ就相当于温度。式（6.4）中U、T、S、p、V即通常热力学系统的内能、温度、熵、压强和体积。式（6.3）右端第一项与式（6.4）第一项类似，为系统吸收的热量；式（6.3）的后两项与式（6.4）的后一项类似，都相当于系统对外所做的功。

霍金的反驳

黑洞是广义相对论预言的天体，面积定理是从广义相对论和微分几何推出的结论，这里面没有引入热效应和统计物理假定，黑洞表面积怎么可能是熵呢？黑洞怎么会出现热力学性质呢？如果黑洞有温度，就会有热辐射。但是广义相对论告诉我们，黑洞是只进不出的天体，内部的任何东西都跑不出来，怎么可能产生热辐射呢？霍金对贝肯斯坦等人的工作很不以为然，认为贝肯斯坦错误理解了自己的面积定理。

霍金和另外两位物理学家，巴丁和卡特，重新研究了贝肯斯坦等人的工作，认为式（6.2）与式（6.3）虽然正确，但并不表示热力学关系。式（6.3）像热力学第一定律但不是热力学定律；式（6.1）像热力学第二定律，但也不是热力学定律。霍金他们称其为黑洞力学第一定律和黑洞力学第二定律，认为它们只是力学定律，不是热力学定律。他们还类似得到了黑洞力学的第三定律和第零定律，如表6-1所示。

表**6-1**　黑洞力学定律与普通热力学定律的比较

	普通热力学	黑洞力学
第零定律	处于热平衡的物体，具有均匀温度T	稳态黑洞的表面上，κ是常数
第一定律	dU＝TdS＋ΩdJ＋VdQ	$dM=\frac{\kappa}{8\pi}dA+\Omega dJ+VdQ$
第二定律	dS≥0	dA≥0
第三定律	不能通过有限次操作，使T降到零	不能通过有限次操作，使κ降到零

霍金等人认为，黑洞表面积A像熵，但不是熵；表面引力κ像温度，但不是温度。黑洞没有温度，所以不会有热辐射，原来的黑洞理论仍然是正确的，黑洞就是一个只能进不能出的天体，洞内的任何物质都不可能跑出来。

霍金、巴丁和卡特是在参加一个暑期讨论班时完成上述研究的，在论文中他们明确表示了不同意贝肯斯坦等人对黑洞的热力学解释。

霍金观点的转变：黑洞有热辐射

讨论班结束之后，霍金返回剑桥。与贝肯斯坦的争论在他的头脑中无法消除，他在反对贝肯斯坦观点的同时，又觉得贝肯斯坦的怪异想法很有吸引力，很具启发性。他又忍不住回过头来想：万一贝肯斯坦是对的呢？如果贝肯斯坦是对的，黑洞真的有温度，就应该有热辐射，黑洞就一定会以黑体辐射的形式射出粒子。这可能吗？

经过反复思考研究，霍金把量子效应附加到黑洞上，用弯曲时空量子场论的方法证明，黑洞真的能辐射出粒子，粒子的能量分布是黑体辐射谱。黑洞表面引力κ恰恰是黑体辐射谱显示的温度。

所谓弯曲时空量子场论，就是引力场不量子化，仍看作经典场，但把物质场量子化，研究量子场方程在弯曲时空背景下的性质。采用这种半经典半量子的方法，是由于引力场量子化问题碰到了巨大困难，至今尚未解决。

霍金所用的弯曲时空量子场论方法，有点像玻尔的量子论，也有点像非相对论的量子力学，在这两种量子理论中，物质被量子化了，但电磁场没有量子化，仍看作经典场。历史表明，这样的半经典半量子化理论是能够解决不少问题的。

霍金的工作震动了理论物理和天体物理界，黑洞不再是只进不出的天体，考虑量子效应后它会产生热辐射，黑洞具有温度。为了纪念霍金的成就，黑洞的热辐射被称为霍金辐射。

在霍金做出这一成就后，他的老师斯亚玛评价说：“毫无疑问，霍金已成为20世纪最伟大的物理学家之一了。”斯亚玛又自豪地说：“我对

广义相对论有两个重要贡献，一是培养了霍金这个学生，二是把彭罗斯拉进了广义相对论的研究领域。”

黑洞里面是单向膜区，时间的方向指向奇点，怎么可能有粒子从黑洞中跑出来，形成热辐射呢？霍金在给出严格数学证明的同时，也给出了一个清晰的物理解释。有关讨论要从真空涨落谈起。

真空涨落

当时狄拉克的相对论性量子力学已经进一步发展成量子场论。狄拉克关于真空的思想也被进一步发展了。按照量子场论，真空并不是完全平静的，不断会有虚的正反粒子对产生，其中一个粒子是正能，另一个是负能，产生之后很快湮灭，这种现象叫真空涨落。

但是我们从来没有看到这种虚正反粒子对的产生，特别是谁也没有见过固有能量为负的粒子，这是为什么呢？这是由于测不准关系（即“不确定关系”）在起作用。根据测不准关系

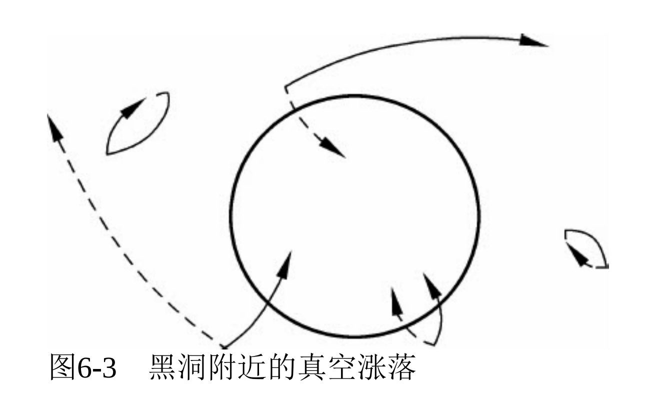
$$\Delta t \Delta E \sim \frac{\hbar}{2} \quad (6.5)$$

由于虚粒子存在的时间Δt非常短，要想在Δt的时间内观测到它们，就会受到量级为

$$\Delta E \sim \frac{\hbar}{2\Delta t} \quad (6.6)$$

的能量干扰，这一能量恰好掩盖了虚粒子对的存在，所以我们不可能直接观察到虚粒子对，当然也就不可能观察到虚的负能粒子。虽然没有直接观察到真空涨落，真空涨落的间接效应却被普遍观察到了，所以真空涨落的观点和理论很快被学术界普遍接受。

霍金辐射


图6-3　黑洞附近的真空涨落

霍金利用真空涨落来解释黑洞辐射（图6-3）。黑洞外部的真空当然也会发生涨落。如果黑洞外部产生一对虚正反粒子，然后又湮灭，或者虚粒子对一起掉入了黑洞，这都不会产生特殊的效应，也不会导致黑洞辐射的产生。但是还有一种不对称的情况，就是虚粒子对中负能的一个掉进黑洞，正能的飞向远方，这种情况就会导致黑洞辐射的产生。下面我们来详细解释一下。

假设在黑洞附近产生的虚粒子对是电子和正电子。电子是正物质，正电子属于反物质，通常提到的物质和反物质都是正能的，提到的电子和正电子当然也是正能的。不过我们现在讨论虚过程，在虚电子对中的电子和正电子，一个是正能，另一个是负能。可以是正能电子和负能正电子，也可以是负能电子和正能正电子。为了讨论方便，我们假定虚粒子对中电子带正能，正电子带负能。

现在负能粒子正电子落入了黑洞，正能电子飞向了远方。落入黑洞的负能正电子，顺着时间前进，穿过单向膜区到达奇点，与聚集在奇点处的物质汇合，使那里少了一个电子的质量（注意，电子和正电子只是电荷相反，质量和其他物理量都相同），多了一个正电荷。

远方的观测者看到一个电子从黑洞处飞过来了，它具有正能量和负电荷，同时看到黑洞少了一个电子质量，多了一个正电荷（注意，无毛定理还是允许黑洞存在三根毛的，所以外部观测者能够看到黑洞质量和

电荷的变化）。于是，他认为黑洞向他辐射了一个电子，这个电子带出来原本属于黑洞的一点点质量和电荷。

霍金又进一步阐述了这一物理图像。他说，视界（黑洞表面）附近真空涨落产生的虚电子对，其中的负能正电子落入了黑洞，顺着时间方向落向奇点，正能电子飞向远方；这一过程相当于黑洞奇点附近产生一个正能电子，它逆着时间穿过单向膜区到达视界，在那里被视界散射，再顺着时间进展飞向远方。

由于视界附近的真空涨落大量存在，会有大量负能粒子落入黑洞，与其成对的正能粒子大量飞向远方，这就构成了黑洞的辐射，霍金严格证明了这种辐射是黑体辐射，具有普朗克谱，也就是说，这是纯粹的热辐射，从辐射谱可以看出辐射温度，它也就是黑洞的温度。霍金证明这一温度恰为

$$T=\frac{\kappa}{2\pi K_B} \tag{6.7}$$

与贝肯斯坦给出的完全一致。不难看出，和上式对应的黑洞熵的表达式为

$$S=\frac{K_B}{4}A \tag{6.8}$$

式中，κ为黑洞表面引力，A为黑洞的表面积，K_B为玻耳兹曼常数。

读者可能会产生一个疑问，真空涨落会不会产生相反的现象，正能粒子落入黑洞，而负能的一个飞向远方呢？科学研究回答说：不会。

这是因为普通的时空区（包括黑洞外部）不允许负能粒子单独存在，负能粒子只能在真空涨落过程中，在虚粒子对中瞬间出现，然后很

快湮灭。

黑洞内部的时空区则不同，它允许负能粒子长期存在。如果虚粒子对中正能的一个掉进了黑洞，洞外时空不允许负能粒子久留，所以负能的一个必定跟着掉进去。

因此不会出现“正能粒子落入黑洞，负能粒子飞向远方”的相反的效应。只会存在负能的掉进去，正能的飞向远方的效应，这一效应是不对称的。正是这一“不对称”，导致了黑洞热辐射的产生。

于是霍金证明了黑洞能产生热辐射，还真的有温度，当然也就真的有熵。为了纪念霍金的这一功绩，黑洞热辐射被称为霍金辐射。他一生最杰出的工作当推霍金辐射的发现。

霍金与贝肯斯坦的成就是历史性的。黑洞是广义相对论预言的天体，在论证黑洞存在时，人们只用了相对论、时空弯曲和几何知识，根本没有引进统计物理和热力学，却居然得到了黑洞有温度和熵的结论，这太奇妙了。

在证明黑洞辐射时用了量子理论的知识，但是只用了量子论的基本原理，没有涉及任何具体的物质结构模型。黑洞热性质似乎表明“热”与“万有引力”之间存在本质联系。

克尔-纽曼黑洞的温度

与史瓦西黑洞一样，克尔-纽曼黑洞也有温度，有热辐射。研究表明，这种黑洞的温度和熵也由式（6.7）和式（6.8）决定。

克尔-纽曼黑洞的表面引力的表达式比较复杂，由

$$\kappa=\frac{r_{+}-r_{-}}{2(r_{+}^{2}+a^{2})} \qquad (6.9)$$

表示。式中r_{+}与r_{-}分别为黑洞外视界和内视界的位置，如式（5.10）所示。

克尔-纽曼黑洞的霍金辐射中含有自旋为$\frac{1}{2}$的粒子（如电子、质子等），这一点是由我们课题组首先证明的。霍金证明球对称的史瓦西黑洞热辐射各种粒子后，很快就有人证明了克尔-纽曼黑洞热辐射自旋为整数的各种粒子（玻色子），但证明热辐射自旋为半整数的费米子却遇到了极大困难，关键是要用到弯曲时空中的旋量方程，这种方程中粒子波函数的各分量耦合得很厉害，很难求解。刘辽教授和许殿彦教授带领我们这个组，对有关方程做了退耦，并找到了严格解，最终完成了这一证明。

从式（6.9）可知，极端黑洞的κ＝0，也就是说，极端黑洞的温度是绝对零度。所以，有人推测“宇宙监督”就是热力学第三定律。第三定律认为：不可能通过有限次操作，把系统的温度降到绝对零度。对于黑洞来说，就是禁止黑洞演化成极端黑洞。极端黑洞尚存一张视界膜，如果达不到极端黑洞，当然就更不可能让这层膜消失，奇环也就裸露不了。

安鲁效应

在霍金提出黑洞有热辐射的前夕，安鲁（W．G．Unruh）发现，匀加速直线运动的伦德勒观测者处在热浴中。这就是说，原本一无所有的闵氏时空，所有惯性观测者均认为是真空，但是，在其中作匀加速直线运动的观测者会发现自己周围充满了热辐射，其温度为

$$T = \frac{a}{2\pi K_{\mathrm{B}}} \tag{6.10}$$

这个温度取决于伦德勒参考系的加速度a。

安鲁的结论是惊人的。然而，由于大部分物理工作者不熟悉广义相对论，也由于这一效应过于微弱，目前在实验中还观测不到，这一杰出的工作至今还不为世人所注意，只有少数人知道有这个已被预言但尚未观测到的效应存在。

安鲁等人认为，伦德勒观测者感受到的热效应是一种量子效应，它是由于不同参考系有不同的“真空”而造成的。

通常的物理学都是在平直的闵氏时空的惯性系中讨论的，所以物理学中所说的真空，通常都是指惯性系中的真空。量子场论认为，不同惯性系中的真空是等价的，也就是说真空在洛伦兹变换下是不变的，因此以往没有发现“真空”会对参考系有依赖。

安鲁发现，越出惯性系去讨论“真空”，就会出现问题了。他发现加速参考系的真空和惯性系的真空有所不同，于是人们把惯性系中的真空称为闵氏真空，以区别于非惯性系中的真空。

按照狄拉克的思想，真空不空，有零点能存在。闵氏真空的虚粒子涨落形成零点能（图6-4）。此零点能对于闵氏时空中所有的惯性系都相同。然而，当我们在作匀加速直线运动的伦德勒系中观测时，由于伦德勒真空不是闵氏真空，它的能量零点比闵氏真空的能量零点要低，因此，闵氏真空的零点能在伦德勒观测者看来就是高于真空零点的能量，是真实可测的能量。

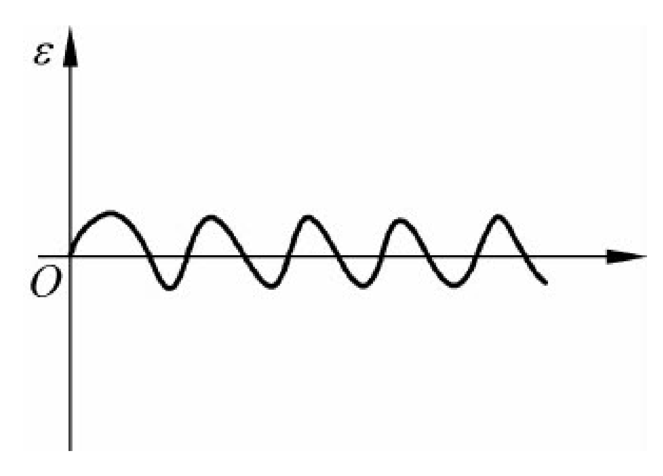


图6-4　闵氏时空零点能

这种能量以最简单的形态出现，那就是具有黑体谱的热辐射状态。因此，伦德勒观测者觉得自己浸泡在热浴之中（图6-5）。

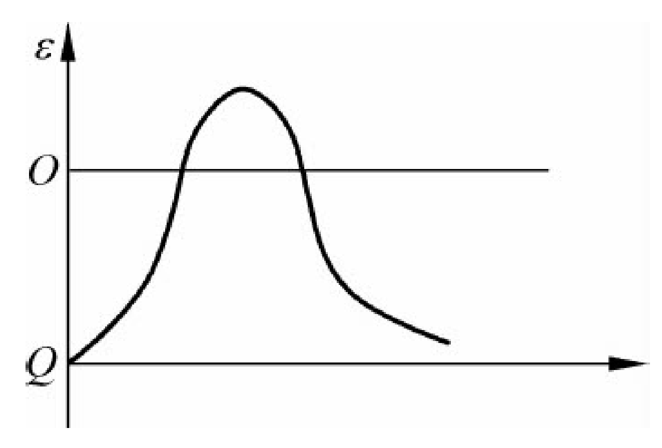


图6-5　伦德勒时空，真空能量的零点下降到Q点，闵氏真空的零点能以热能形式出现

霍金证明了黑洞有热辐射之后，安鲁很快认识到，自己发现的效应

与黑洞热辐射有相同的本质。因此许多人把霍金辐射与安鲁效应一起，称为霍金-安鲁效应。

黑洞的负比热

令人惊讶的是，黑洞的比热容是负的，因而在一般情况下，黑洞不可能与外界达到稳定的热平衡。这是因为史瓦西黑洞的表面引力为

$$\kappa = \frac{1}{4M} \tag{6.11}$$

这意味着黑洞的温度

$$T = \frac{1}{8\pi M K_B} \tag{6.12}$$

此式表明黑洞的温度与它的质量成反比。它放出热辐射后，质量M减小，温度T升高；它吸收外界辐射或物质后，M增大，温度T反而降低。所以它的比热容是负的，以前我们几乎没有见过负比热容的物质。

通常的物质比热容都是正的，吸热后温度升高，放热后温度降低。所以通常物质系统一旦与外界达到热平衡后，平衡就会是稳定的。

如果平衡后由于热涨落外界温度升高一点，热量就会从高温的外界流入系统，正比热容导致系统温度升高，与外界重新达到热平衡。

如果热涨落使系统温度略高于外界，就会有热流从系统流出，系统温度就会下降，也重新与外界达到热平衡。我们通常见到的正比热容物质都是这样，系统与外界的热平衡因而是稳定的。

但是负比热容的黑洞与外界的热平衡不会是稳定平衡。假设一个黑洞与外界达到了热平衡，由于热涨落，外界温度可能会比黑洞升高一点或降低一点。

如果外界温度升高一点，就会有热流流入黑洞，黑洞质量会增加，由于比热容为负，黑洞温度反而降低，洞内外温差加大，高温的外界会有更多的热流进入黑洞，黑洞质量会进一步增大，温度会进一步降低。黑洞与外界的热平衡被打破，黑洞将不断吸收外界物质和热辐射，不断扩大降温，这一过程将永远持续下去。

如果黑洞与外界处于热平衡时，涨落使黑洞温度略高于外界，黑洞热辐射将增加，有热流从黑洞流出，黑洞的质量会减小，负比热容使它的温度进一步升高，与外界的温差扩大，黑洞热辐射将继续增加，输出的热流更大，黑洞又进一步升温，这将导致黑洞温度不断升高，与外界的热平衡彻底被破坏，最后小黑洞会爆炸而消失。

仔细研究表明，在某些特殊情况下，黑洞与外界可以形成稳定的热平衡。一种情况是把史瓦西黑洞放到一个绝热的盒子中，设黑洞质量为M，如果达到热平衡时，盒子中热辐射气体的质量不超过黑洞质量的四分之一时，即不超过$\frac{1}{4}M$时，黑洞与外部气体之间的热平衡可以是稳定的。

另一种特殊情况是，研究发现带电史瓦西黑洞（即R-N黑洞）有一个相变点，位于

$$Q^2 = \frac{3}{4}M^2 \qquad (6.13)$$

处。当

$$Q^2 < \frac{3}{4}M^2 \qquad (6.14)$$

时黑洞的比热容为负，与外界的热平衡不稳定。当

$$Q^2 > \frac{3}{4}M^2 \tag{6.15}$$

时，黑洞的比热容会变成正的，这时黑洞就可以与外界处于稳定的热平衡状态了。

第七章　黑洞的信息佯谬

信息疑难

从黑洞概念产生伊始，就有人指出黑洞存在信息疑难。根据无毛定理，黑洞外部的观测者失去了组成黑洞的物质的几乎全部信息，只能探知黑洞的总质量、总电荷和总角动量，黑洞内部的其他信息完全探测不到了。既不知道黑洞是在什么时候由什么形态的物质形成的，也不知道进入黑洞的物质处在什么状态。对于黑洞外的人，这些信息都失去了，似乎信息不再守恒。

不过，这时问题还不大，只不过信息锁在了黑洞内部，藏在了视界里面，但它们依然存在，并没有在宇宙中消失，从整个宇宙的角度看，信息依然守恒。

霍金辐射发现以后，这个问题就严重了。由于比热容是负的，黑洞温度会在热辐射过程中不断升高，直至整个黑洞爆炸消失。由于黑洞热辐射是标准的黑体辐射，几乎带不出任何信息，所以在原来落入黑洞的物质化为霍金辐射（标准的黑体辐射）的同时，它们所带的信息也全都从宇宙中消失了，信息真的不守恒了。

重子数、轻子数是否守恒？

问题还不仅这一个，粒子物理中的重子数守恒、轻子数守恒等定律也被破坏了。形成黑洞的物质，可以是正物质，也可以是反物质。正物质由质子、中子、电子等组成，重子数（一个质子或一个中子的重子数为＋1）和轻子数（一个电子的轻子数为＋1）都是正的；反物质由反质子、反中子、正电子等反粒子组成，重子数和轻子数均为负。

正物质或等量的反物质形成的黑洞从外界看来是相同的，它们的总质量、总电荷、总角动量都相同，它们的重子数和轻子数当然不同，但无毛定理告诉我们，外界观测者看不见这些毛。

黑洞热辐射时，这些物质化为霍金辐射跑出来，而按照目前的认识，霍金辐射中正粒子和反粒子的产生概率是相同的，与形成黑洞的物质形态无关。这样，重子数守恒定律和轻子数守恒定律都被破坏了。所以，考虑了霍金辐射的黑洞理论，信息守恒被破坏，重子数守恒和轻子数守恒也被破坏了。

不过，重子数守恒和轻子数守恒是否是自然界的严格定律有人有怀疑。李政道先生指出，严格的守恒律往往对应补偿场，在严格的全局对称性被破坏，化为局域对称性的时候，会产生补偿场，即规范场。例如，电荷守恒对应电磁场，能量守恒和动量守恒对应引力场。

而重子数守恒和轻子数守恒相应的对称性，却没有对应的补偿场。因此，有人质疑重子数与轻子数是否严格守恒。所以黑洞理论破坏重子数守恒和轻子数守恒还不是最严重的问题。

幺正性与概率守恒

然而，信息不守恒造成的后果是严重的。它使得量子理论中的概率不再守恒，幺正性被破坏。幺正性是现代场论的基石之一，所有的量子过程的演化都是幺正的。如果幺正性不成立，整个量子场论都需要做大的改动。而且，概率不守恒也是让人难以接受的。

所以，包含霍金辐射的黑洞理论，在理论物理学家中引起了轩然大波，在相对论专家和量子论专家之间展开了一场大辩论。

霍金打赌

1997年，相对论专家霍金和索恩（著名的时间机器专家），与量子物理专家普瑞斯基开玩笑打赌，霍金和索恩认为黑洞过程信息不守恒，普瑞斯基认为信息守恒，谁输了谁给对方订一年棒球杂志。

霍金、索恩：		普瑞斯基：
黑洞中的信息丢失了	1997 年	黑洞中的信息不会丢失，会逸出或残留

霍金经常和别人开玩笑打赌，有一次和索恩为某个问题打赌，谁输了谁给对方订一年黄色杂志。后来霍金宣布自己输了，让助手买了一年的黄色杂志送到对方的家中，引得索恩夫人大为不满。

这次，霍金与索恩认为落入黑洞的物质最后化为了霍金辐射，信息肯定不守恒。普瑞斯基则认为信息守恒十分重要，信息应该守恒。以普瑞斯基为代表的许多量子论专家认为，霍金辐射未必是标准的黑体辐射，可能有一部分信息会被带出黑洞。另外，黑洞虽然辐射时温度不断增高，但很可能会在某一高温下出现某种“量子效应”，使霍金辐射戛然而止，信息作为炉渣保留在残余的黑洞里面。

2004年，霍金突然宣布自己输了！他在爱尔兰举行的一次国际相对论大会上作了一个报告，但这只是一个高级科普报告，没有给出具体的数学物理推演。他宣布自己输的理由是，以前把黑洞想象得太理想了，真实的黑洞过程，应该信息守恒。

索恩则强调，这事不能由霍金一个人说了算，自己不承认输了。霍金没有买到棒球杂志，买了一年板球杂志，让助手交给了普瑞斯基。普

瑞斯基表示，没有听懂自己为什么赢了。

这件事当时轰动世界。一些记者对到会的相对论专家作了民意调查，大部分人认为信息应该守恒，但也有相当一部分专家认为信息不守恒。

霍金当时表示，他不久将发表严格的数学物理论文来阐述自己为何改变观点，但我们至今也没有看到他发表这方面的学术论文。

维尔塞克与帕瑞克的证明

霍金为什么会改变看法呢？这是因为，当时许多量子论专家作了证明黑洞过程信息守恒的论证，特别是诺贝尔奖获得者维尔塞克及其学生帕瑞克的工作，这些工作影响了霍金的思想。维尔塞克是研究强相互作用的，因为对量子色动力学的贡献获得过诺贝尔物理学奖。他认为信息应该守恒，指导帕瑞克对黑洞热辐射作了深入研究。

他们认为，以前有关霍金辐射的证明，都忽略了辐射对黑洞的反作用。例如，考虑黑洞辐射一个光子，以往的证明都没有考虑光子射出后黑洞半径会缩小，他们认为，这一“缩小”虽然微乎其微，但影响很大。正是这一“缩小”使辐射出的光子带出了一点点信息，恰是这一点点信息保证了量子演化的幺正性，保证了信息守恒。他们发表了论文，对自己的观点作了严格证明。他们的意见是有道理的，以往所有对霍金辐射的证明，都没有考虑辐射导致的黑洞半径收缩。

我们读过霍金和其他相对论专家证明黑洞热辐射的不少论文，而且自己也做过很多黑洞热辐射的研究。不随时间变化的、旋转、带电的黑洞是最一般的稳态黑洞，这类黑洞的霍金辐射中包含电子、质子等自旋为1/2粒子的证明，就是首先由我们这个组，在刘辽教授和许殿彦教授带领下给出的。作这些证明时，我们同样没有考虑霍金辐射与黑洞半径收缩的相互影响。

为什么大家的证明都没有考虑霍金辐射导致黑洞半径的收缩呢？因为这一收缩实在太小了。太阳质量的黑洞，半径才3千米，射出一个粒子，你说质量能有多大变化？黑洞半径能收缩多少？所以大家都忽略了这一收缩。

帕瑞克与维尔塞克的工作很漂亮，他们严格证明了自己的猜测：正是这一忽略导致了信息丢失。他们在自己的论文中考虑了这一影响，最后严格证明了霍金辐射过程保持幺正性，热辐射带出了一点信息，从而信息依然守恒。

黑洞表面的势垒

他们还指出，霍金虽然在解释自己的黑洞热辐射理论时，强调这种辐射是一种“量子隧道效应”，是洞内粒子通过逆时运动，穿越黑洞视界处的势垒的结果。但是从霍金的证明文章中并看不出势垒的存在，更没有给出势垒的具体情况和位置。维尔塞克和帕瑞克声称他们的文章给出了势垒的具体情况和位置。

隧穿过程的图像

他们把粒子理想化，看作一个球面波（S波），粒子（S波）射出黑洞前，视界位置在r_{in}处，粒子射出后，黑洞收缩，视界收缩到r_{out}处（图7-1）。这时粒子（S波）已处于黑洞外了。他们认为，势垒仅仅在粒子射出的过程中出现，位置就在r_{in}与r_{out}之间。实际上，粒子射出的过程，就好像粒子不动，势垒向内移动的过程，从r_{in}处移动到r_{out}处（图7-2）。

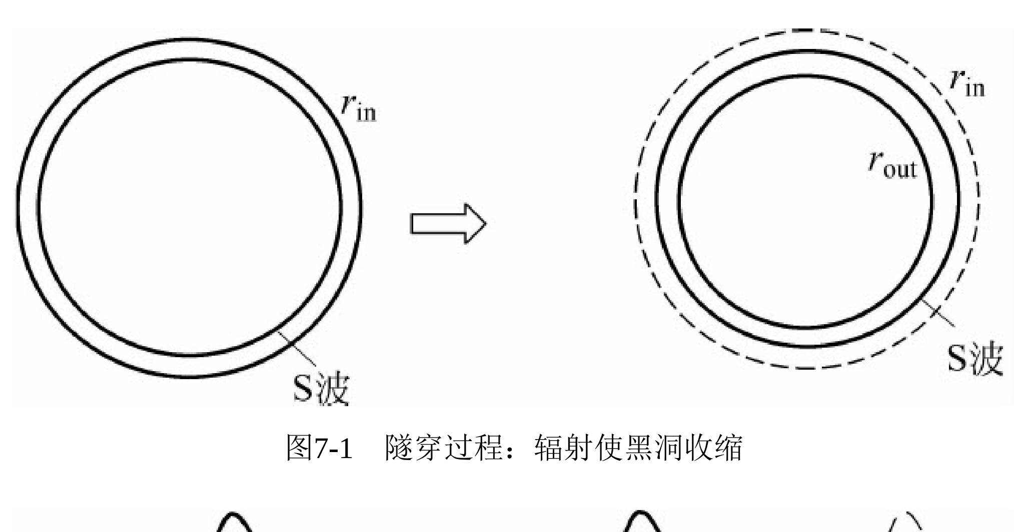


图7-1　隧穿过程：辐射使黑洞收缩

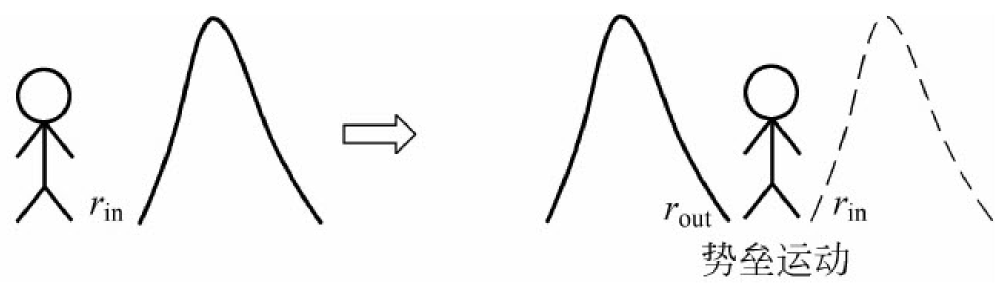


图7-2　隧穿示意图：粒子（图中小人）向外穿过势垒，等价于粒子不动，势垒向内移动

维尔塞克和帕瑞克等众多理论物理学家的工作，都似乎支持了黑洞过程信息守恒的观点，他们的努力促使霍金重新考虑自己的观点。他反思后认为，自己以前把黑洞想象得太理想化了，真实的黑洞过程比较复

杂，信息不会被绝对地锁在黑洞内部，也不会在热辐射过程中真正丢失。于是他改变了自己的观点。霍金态度的转变，影响非常大，学术界似乎已经一边倒地认为黑洞过程不会破坏信息守恒。

然而，仍有一部分相对论研究者（例如索恩等人）不相信黑洞过程会信息守恒。

猜测：不存在信息守恒定律

我和我的学生张靖仪讨论了这个问题。我们认为，物理学中有能量守恒、动量守恒、电荷守恒等许多守恒定律，并没有公认的信息守恒定律。

信息论专家们认为信息可以视为“负熵”，包括霍金在内的许多物理学家也承认这一点。大家知道，“熵”恰恰是个不守恒的量，热力学第二定律的精髓就是认为熵不守恒。

孤立系统和绝热系统（与外界不存在热交换的系统），如果不处在平衡态，其中的熵只会增加，绝不可能减少。一般说来，自然界发生的过程（除去理想化的可逆过程之外）都是熵增加的过程。

所以，如果信息真的是“负熵”，在自然过程中，它肯定会不断减少，绝对不会守恒。因此，我们认为，没有理由认为“黑洞过程”必定信息守恒。而且，我们认为黑洞过程应该有信息丢失。

黑洞过程信息不守恒

前面我们已经谈到，黑洞的比热容是负的，这使得黑洞不可能与外界形成稳定的热平衡。即使黑洞在某一瞬间与外界达到了热平衡，温度相等，热涨落一定会破坏这一平衡，使黑洞和外界形成温差，而且这种温差会不断扩大。作为霍金辐射的热流出射过程，以及落入黑洞的辐射构成的热流入射过程，都将由于温差的存在而成为“不可逆过程”。热力学第二定律告诉我们，“不可逆过程”是熵产生的过程。如果信息是负熵，不可逆过程就是信息丢失的过程。所以，黑洞的辐射和吸收过程，都将是信息丢失的过程，信息肯定不会守恒。

帕瑞克证明的漏洞

那么，维尔塞克和帕瑞克怎么会证明了黑洞的霍金辐射信息守恒呢？我们猜测他们在证明过程中可能假设了霍金辐射是一个“可逆过程”。“可逆过程”中没有熵产生，熵是守恒的，信息自然也会是守恒的。

我们对帕瑞克等人的工作进行了详细研究。他们是以史瓦西黑洞为例作的证明，证明了这种球对称的静态黑洞在辐射静质量为零的粒子时信息守恒。为了弄清楚他们证明过程中是否假定了霍金辐射是一个可逆过程，我们把他们的工作推广到了更一般的情况。

我们先把帕瑞克等人的工作推广到了一般的稳态黑洞，包括黑洞转动和带电的若干情况；又把黑洞辐射的粒子从静质量为零的情况推广到静质量不为零的情况，以及辐射粒子带电的情况，等等。我们发现，对于这些更一般的情况，帕瑞克等人的证明，都有效，都成立，幺正性都能保证，信息都守恒。

然而，我们也注意到一个情况：他们的所有证明都需要使用一个热量表达式

$$\Delta Q = T\mathrm{d}s \tag{7.1}$$

式中ΔQ为系统与外界交换的热量，T为温度，ds为过程中熵的变化。

热力学告诉我们，此公式仅在可逆过程中成立，对于不可逆过程则不成立。一般说来，对于不可逆过程，应有

$$\Delta Q < T\mathrm{d}s \tag{7.2}$$

因此，我们认识到，帕瑞克与维尔塞克等人的这一工作，在数学上是严格的，而且是普适的，对于各种黑洞、辐射各种粒子都成立。但他们都用了黑洞的霍金辐射过程是可逆过程的假定。

因为黑洞的比热容为负，不可能与外界达成稳定的热平衡，黑洞与外界必定存在温差，不管是作为黑洞出射热流的霍金辐射，还是黑洞吞食外部热流的吸积过程，都是不可逆过程，熵一定会增加，因此也就不可能信息守恒。

所以，我们的研究表明，维尔塞克等人的工作还不能认为已经证明了黑洞辐射过程信息守恒。有关黑洞过程是否信息守恒的争论还将继续下去。

我和我的学生们对信息守恒问题的研究工作，已在国内外很多杂志上发表。其中一篇（张靖仪，赵峥）还于2008年获得了汤姆孙-路透“科学前沿——中国卓越研究奖”。

黑洞中的信息当真不会逸出吗？

不过，霍金认为以往“把黑洞过程过于理想化”了的观点也是有道理的。真实的黑洞过程是否会有部分信息逸出呢？虽然总体来说黑洞过程信息不会守恒，但落入黑洞的物质的全部信息就真的一点都跑不出来吗？

我们认为，也许会有部分信息从黑洞中逸出。现在我们给出两种信息从黑洞中逸出的可能途径。

动态黑洞的启示

以往对于黑洞辐射的研究，都局限于稳态黑洞，即不随时间变化的黑洞。这是因为人们认为，辐射出的粒子的能量远小于黑洞能量，辐射过程对黑洞的影响完全可以忽略。另一方面，如果考虑黑洞的变化，研究中的困难会大大增加。

不过，我们前面介绍帕瑞克等人的工作时，就看到忽略辐射过程对黑洞的反作用，是值得推敲的。他们的工作虽然未能证明黑洞辐射过程信息守恒，但他们向人们明确显示了不应轻易忽略辐射过程对黑洞的影响。

而且，真实的黑洞都是在不断变化的，不断会有物质落入黑洞。特别是黑洞周围往往形成吸积盘，盘中的物质会大量落入黑洞，引起黑洞半径的变化。另外，帕瑞克只考虑了一个出射粒子自身对黑洞的影响，真实的黑洞辐射绝不会是一个粒子、一个粒子地往外跑，往往是大量粒子一起往外涌。特别是高温下的黑洞，出射能流（热辐射流）会引起黑洞半径的明显变化。

真实的黑洞都处在不断吸积和辐射的过程中，因而质量和半径都处在不断变化中，所以真实的黑洞都是动态的，不是稳态的。黑洞的这种非稳态状况，会不会对信息逸出产生影响呢？会不会有信息从动态黑洞的辐射过程中跑出去呢？

动态黑洞热性质的探索

对动态黑洞的研究比对稳态黑洞的研究困难得多。20世纪80年代后期开始出现一些这方面的研究，但都不够成熟，主要是动态黑洞的半径（视界位置）和温度都很难确定，不存在计算动态黑洞视界位置和温度的有效方法。人们用了不少近似，收效不大，而且研究对象仅局限于球对称黑洞。

1990年前后，我和我的学生戴宪新、罗志强、朱建阳、黎忠恒等人对动态黑洞的霍金辐射进行了深入研究，创建了一个研究动态黑洞热辐射的成功方法，不用事先假定黑洞的半径、温度或表面引力，就可以证明黑洞产生黑体辐射，并反过来自动定出黑洞的半径（视界位置）与温度。而且，我们可以逐点计算黑洞表面的温度，这是此前任何人都做不到的。

我们的方法是普适的，不仅可用于球对称的动态黑洞，而且可以用于非球对称的动态黑洞。我们证明，对于非球对称的动态黑洞，其表面温度不是一个常数，不仅随时间变化，而且随方位变化，也就是说这类黑洞表面各点温度不同，存在热流。我们的工作已在国内外许多杂志上发表，但没有引起足够的注意。

近年来，国外的一些相对论专家用另外的方法研究了动态黑洞的热性质，但局限于球对称的动态黑洞。

动态黑洞信息逸出的可能性

我们现在想谈一下对动态黑洞过程信息是否守恒的思考。

对于球对称的静态黑洞，它的三个特征曲面，即事件视界、表观视界和无限红移面是重合的。对于非球对称的稳态黑洞，其事件视界与无限红移面分开，中间出现能层，但表观视界仍然与事件视界重合。

对于球对称的动态黑洞，其表观视界r_{AH}与无限红移面r_{TLS}重合，但事件视界r_{EH}与它们分开了（图7-3），这时在事件视界与表观视界之间出现一种新的能层——量子能层。

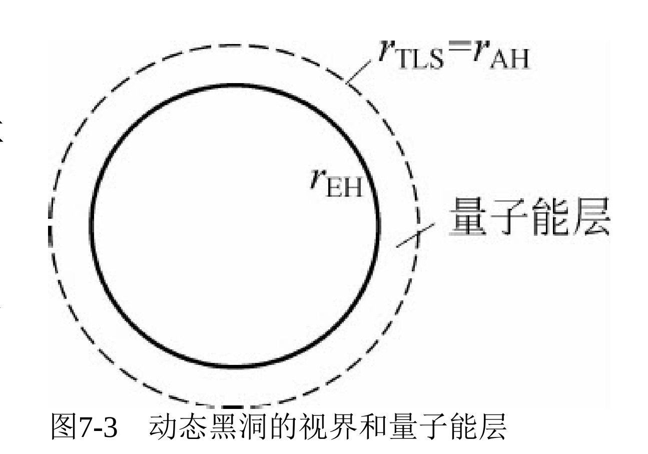


图7-3　动态黑洞的视界和量子能层

黑洞的霍金辐射产生自表观视界还是事件视界，国外的一些文献认为产生自表观视界。但我们的研究表明，霍金辐射产生于事件视界，而不是表观视界。与国外的主流方法不同，我们没有事先假定辐射产生自哪一个视界，而是在用我们自己的方法导出霍金辐射的过程中，自动确定出辐射产生自事件视界，而不是表观视界，并自动定出热辐射的温度。

我们证明了产生自事件视界的霍金辐射具有严格的黑体谱。问题是当此辐射穿越量子能层时是否有变化？是否偏离黑体谱，从而带出信息？

如图7-3所示，表观视界位于事件视界之外，量子能层中时间箭头的方向仍然指向黑洞内部，因此粒子可能无法经典地穿过量子能层，可

能还要再通过量子效应（如隧道效应）才能射出。量子能层处很可能存在势垒，此势垒是否使辐射偏离黑体谱，带出信息，值得探讨。

此外，我们在证明事件视界产生霍金辐射时，使用了粒子的动力学方程（如克莱因-高登方程，狄拉克方程等）在视界处的渐进方程。渐进方程的使用是否引入了某些近似，丢失了某些东西，也是值得进一步推敲的。

因此，对于动态黑洞的霍金辐射会否带出部分信息，还是值得进一步研究的，目前下定论尚为时过早。

时空扰动引来的启示

在用整体微分几何研究时空的时候，有人注意到外界对时空的扰动，有可能引起光锥的变化，如图7-4所示。在未发生扰动时光锥是45°角张开。光锥内部是A点的因果过去（下半光锥）和因果未来（上半光锥）。处于A点的粒子若静质量不为零，则只能到达上半光锥的内部，若静质量为零，则只能沿上半光锥的光锥面运动。无论该粒子是否静质量为零，都不可能跑到光锥外面去，因此不可能到达B点。

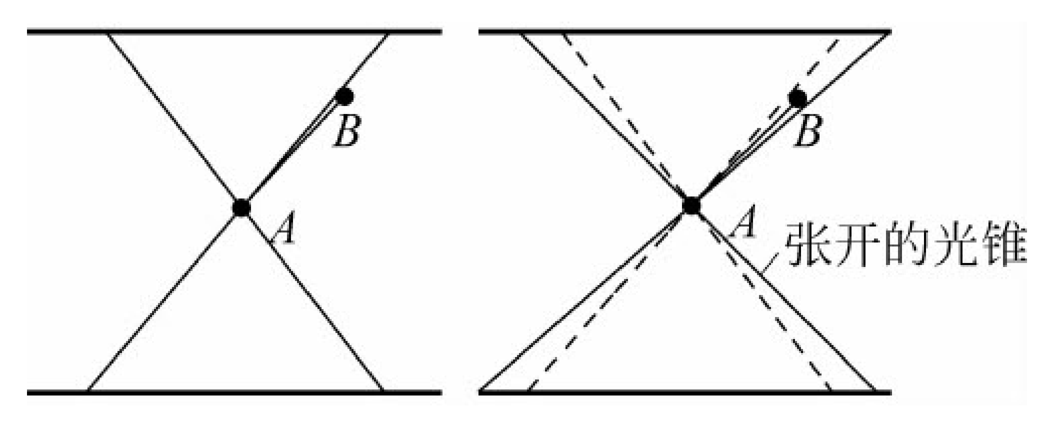


图7-4　时空扰动导致的光锥变化

但是，如果时空受到扰动，光锥有可能变胖，如图7-4右边所示，这时B点有可能被包在光锥的内部，处于A点的“因果未来”，因此位于A点的粒子就可以跑到B点。

如果此后光锥又在扰动下变瘦，已跑到B点的粒子又位于光锥之外了。这样，在时空扰动下，A点的粒子跑到了光锥以外的B点，那本来只有超光速粒子才可以到达的地方。现在，粒子并没有超光速，却已经到达了那里。

黑洞的表面（事件视界）就可以视为光锥面，位于黑洞内部或黑洞

表面（例如A点）的粒子本不可能跑到黑洞外部的B点。但由于时空受到了扰动，光锥时而张大，时而缩小，则位于A处的粒子就有可能跑到黑洞外部去，并带出黑洞内部的一些信息（图7-5）。

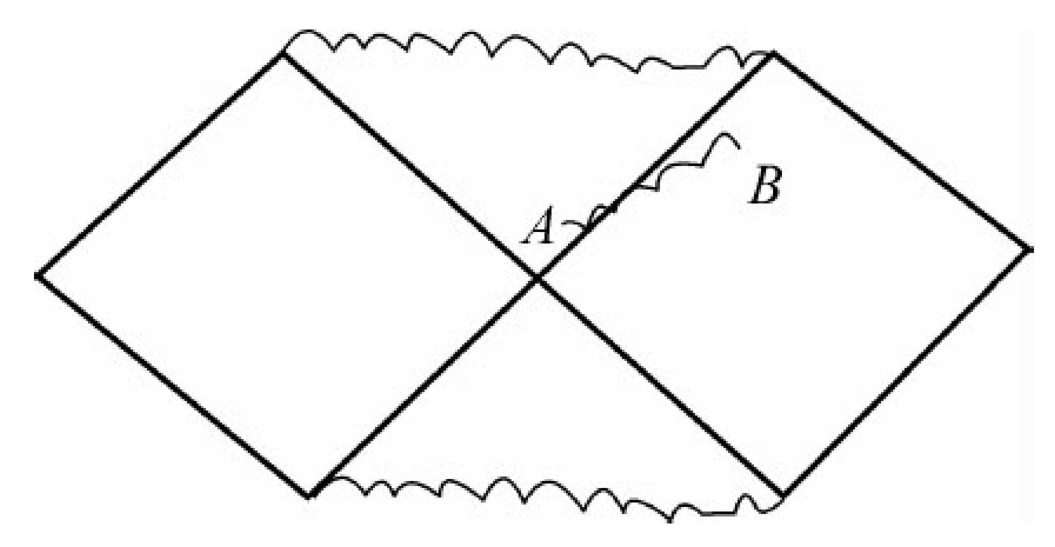


图7-5　黑洞视界附近的时空扰动造成洞内粒子和信息的逸出

特别是近极端黑洞的情况，单向膜区已薄到几乎只剩一层膜，上述时空扰动非常可能使洞内粒子及其所带信息逸出到洞外。

结论与讨论

我们可以得到几点结论：

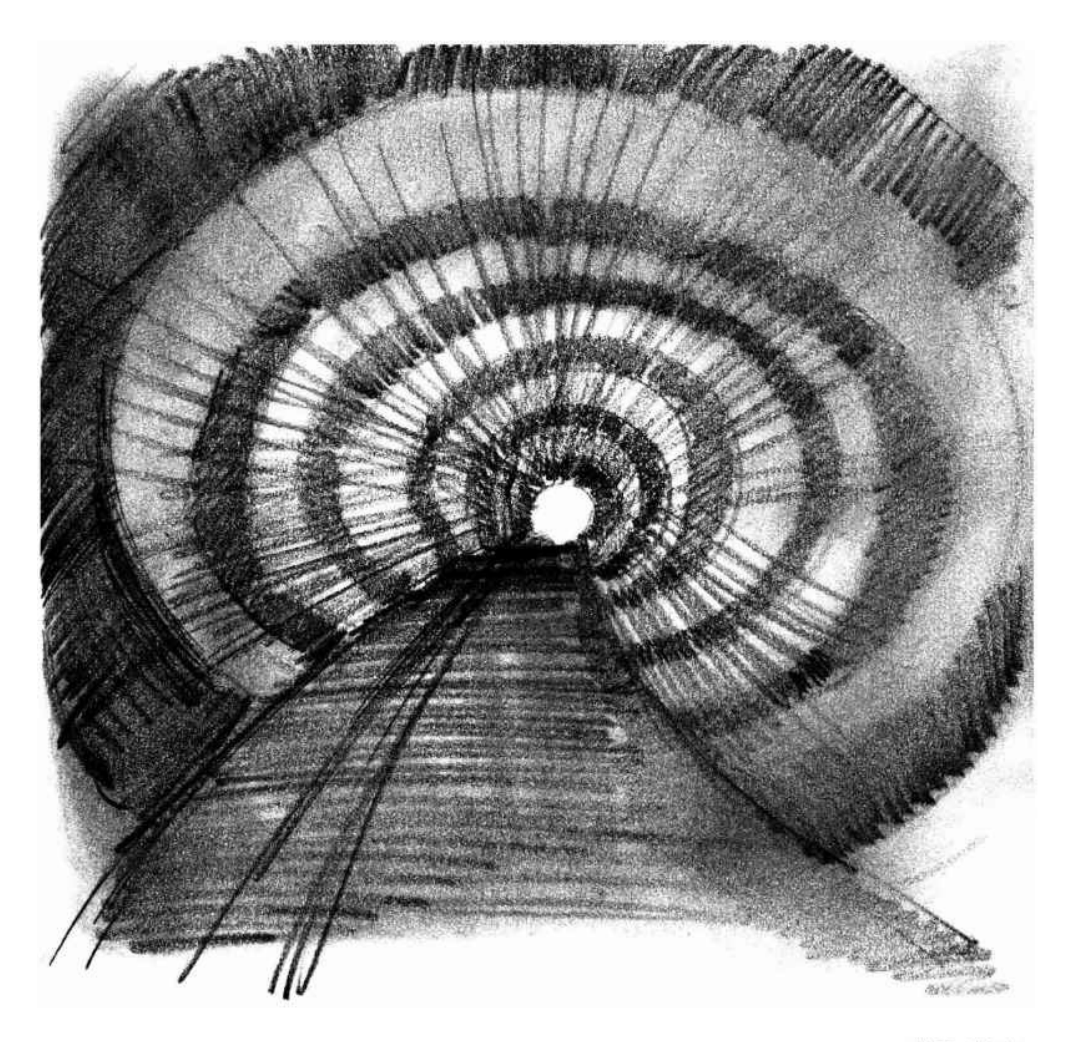
第一，物理上不存在信息守恒定律，如果信息是负熵，则信息应该不守恒。不应企望黑洞过程（如吸收或辐射等过程）信息守恒。

第二，维尔塞克与帕瑞克关于霍金辐射信息守恒的证明，在数学上是正确而严格的，所用的方法对各种黑洞和各种粒子均适用。

但是，他们的证明过程中假定了过程可逆，然而真实的黑洞过程肯定是不可逆过程。在不可逆过程中得不到他们希望得到的结论。所以，他们的工作未能真正证明黑洞过程信息会守恒。

第三，霍金认为以前把黑洞过程看得太理想化了，真实的黑洞过程中，可能会有部分信息逸出，也可能会有部分信息永久锁死在黑洞内部。这些想法可能是对的，但这并不意味着信息一定守恒。

第四，我们谈到了黑洞中信息可能逸出的另外两点考虑：动态黑洞热辐射有可能偏离黑体谱；黑洞视界附近时空涨落，有可能导致一些信息逸出。然而，有关问题还需要进一步研究。



绘画：张京

第八章　奇点——时间有无开始与终结

奇点定理的哲学意义

现在我们把注意力转向黑洞内禀奇点的研究。这种奇点时空曲率发散，而且此类发散不能通过坐标变换来消除，因而它表示时空本身存在奇异，也就是说存在“病态”。令人意外的是，对内禀奇点的研究把科学家们引向了“时间是否有开始和终结”的探讨。

时间有没有开始和结束？千百年来，许多伟大的思想家对此进行过深入的探索，但那都是些哲学家和神学家，而且有关的探讨都局限在哲学分析、神学研究和主观猜测上。从20世纪60年代开始，物理学介入了这一问题的研究。其标志是彭罗斯和霍金提出的奇点定理（或称奇性定理），该定理概括并超出了关于宇宙开端和终结的研究。

奇点定理可粗略表述为：只要广义相对论成立，因果性良好，有物质存在，就至少有一个物理过程，其时间存在开始或存在结束，或既有开始又有结束。这一数学定理在物理学和哲学上的重大意义是不言而喻的。遗憾的是，到目前为止，它还没有引起哲学界的注意，科学界对它的重视也远远不够。

下面，我们将对奇点定理及其造成的困难作简要的介绍，并讨论其可能引发的重大科学与哲学进展。

内禀奇点与坐标奇点

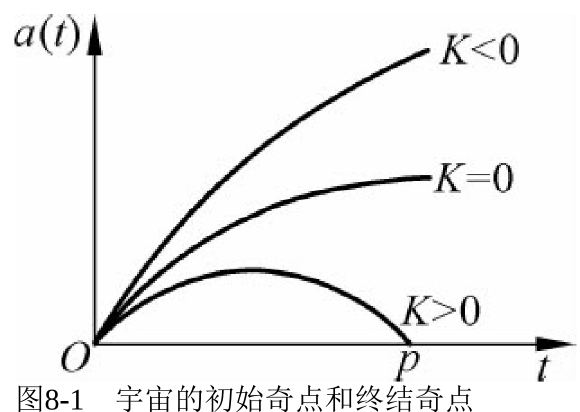


图8-1　宇宙的初始奇点和终结奇点

广义相对论诞生不久，人们就发现爱因斯坦方程的解（即满足广义相对论的时空）普遍存在奇异性（奇点或奇环等）。奇异性有两类，一类是内禀奇异性，是时空本身存在问题，表现为时空曲率发散，而且这种发散不能通过坐标变换加以消除。例如，球对称黑洞（史瓦西黑洞）的“中心”奇点，转动黑洞内部的奇环，大爆炸宇宙的初始奇点（图8-1中的O点），大塌缩宇宙的大挤压终结奇点（图8-1中的p点）等，都属于这类奇异性。

另一类是坐标奇异性，这种奇异性不是时空本身存在问题，而是由于坐标系选择不当引起的，可以用坐标变换加以消除。只存在坐标奇异性的地方，时空曲率正常，并不出现发散。当然具有坐标奇异性的地方，往往也有物理意义，例如前面谈到的各种黑洞的表面（事件视界），都存在坐标奇异性。

不过，下面我们探讨的都是内禀奇异性。为了讨论方便，以后我们把出现内禀奇异性的地方（奇点、奇环等），统称为奇点。

栗弗席兹与卡拉特尼科夫的失误

20世纪70年代对奇点问题的深入研究，起源于苏联物理学家的工作。当时朗道已经去世，他的助手栗弗席兹与另一位物理学家卡拉特尼科夫联手，对广义相对论中的奇点问题展开了研究。

把他们吸引到这一问题上来的原因是，他们注意到当时已知的广义相对论场方程的解，除去作为真空的闵可夫斯基时空和德西特时空（常曲率时空）之外，一般都存在内禀奇点，奇点处时空曲率发散，因而是物理理论无法了解的地方，它随时可能产生无法预测的信息。环形奇点（如转动黑洞中的奇环）的附近，还会出现“闭合类时线”，沿这类曲线生活运动的人，会回到自己的过去。这简直令人不可思议。因此他们觉得，真实的物理时空不应该存在奇点。

那么，为什么满足广义相对论的时空普遍存在奇点呢？他们认为，这是因为人们在求解爱因斯坦场方程时，把时空的对称性假设得过于理想所致。

他们想，当一个星体做标准的球对称塌缩时，所有的星体物质都球对称地下落，因此最终都挤到球心，形成奇点，例如史瓦西黑洞中心的奇点。

但是真实的星体塌缩不可能是标准而严格的球对称塌缩，所有各个方向塌向球心的物质会在中心附近交叉而过，最终不会形成奇点。

克尔黑洞中的奇环，也是人们把星体塌缩想得太理想所致，当旋转的星体做标准的轴对称塌缩时，才会形成奇环。但真实的旋转星体，塌缩时不会严格轴对称，塌缩的星体物质也会相互碰撞，最终“擦肩而

过”，不会形成奇环。

总之，他们认为奇点和奇环的出现，都是因为人们把星体塌缩时的对称性想得太好所致。真实的塌缩过程不可能保持如此严格的对称性，所以奇点和奇环都不可能真正形成。

人们为什么要把物质和时空的对称性设想得那么完美呢？这是因为广义相对论的场方程过于复杂，求解起来非常困难。把对称性设想得越好，场方程越可能化简，越容易求解。所以，场方程的复杂性迫使科学家们把时空的对称性想象得尽可能好，这样，他们才求出了场方程的一些解。卡拉特尼科夫与栗弗席兹认为，令人遗憾的是这也导致了奇点的出现。

他们进行了较为深入的研究，最后得到一个结论：奇点并非广义相对论的必然结果，奇点的出现是把时空和物质的对称性设想得太好所致。真实的时空和物质分布不可能保持严格的对称性，所以真实的时空中不应该存在奇点。

后来，栗弗席兹与卡拉特尼科夫的这一结论被证明有错误，他们本人也认识到了。

彭罗斯的创新思维

彭罗斯不相信他们的结论，认为他们的证明过程有误。

彭罗斯指出，奇点是广义相对论理论固有的“毛病”，满足广义相对论的真实时空中都不可避免地存在奇点。

经过仔细思考与研究，彭罗斯和霍金证明了奇点定理。这个定理可粗略表述为：只要爱因斯坦的广义相对论正确，并且因果性成立，那么任何有物质的时空，都至少存在一个奇点。

更加值得注意的是，彭罗斯和霍金在提出并证明奇点定理的过程中，对奇点概念进行了重新认识，提出了极其重要的新思想：奇点应该看作时间的开始或终结！

这就是说，他们的奇点定理证明了一定存在时间有开始和终结的过程，这使得物理学介入了“时间有无开始和终结”的探讨。

彭罗斯与霍金等人对于奇点的这一认识，来源于对宇宙和黑洞的研究。在大爆炸宇宙模型中，宇宙与时间一起诞生于时空曲率发散的初始奇点；对于其中的大塌缩结局，宇宙与时间又一起终结于时空曲率发散的大挤压奇点。

另一方面，广义相对论告诉我们，黑洞内部的时空坐标要发生互换，原来的时间t成为空间坐标，而径向坐标r则成为时间坐标。所以黑洞内部的等r面不再是球面，而成为等时面。

对于黑洞，时间方向指向r＝0的奇点处。这样，等r面成为“单向膜”，任何进入黑洞的物质只能向r减小的方向运动，不能停留，也不可

能反向运动，而且没有任何力和任何物质结构能够抗拒这种运动。

这是因为，这不是一般的运动，而是一个时间发展的过程，什么力量都不能抵挡，不能不顺着时间方向前进。也就是说，任何物质都必须“与时俱进”。

黑洞内部整个是单向膜区，黑洞的边界（视界）是单向膜区的起点。进入黑洞的飞船和任何其他物质都将在有限的时间内穿越单向膜区到达奇点。值得注意的是，由于时空坐标互换，r＝0现在不是黑洞的“球心”，而是时间的终点。这就是说，进入黑洞的飞船和宇航员的时间将在有限的经历中结束。

按照广义相对论，还可能存在白洞。白洞是黑洞的时间反演。它的内部也是单向膜区，只不过时间方向从奇点r＝0处指向视界处，所以它的单向膜的单向性与黑洞相反。需要强调的是，白洞内部的r＝0处，不是时间的终点，而是时间的起点。

奇点：时空中无法修补的洞

有奇点的时空，称为奇异时空。然而，如果有人把奇点从时空中挖掉，剩下的时空还能叫做奇异时空吗？彭罗斯和霍金认为即使把奇点挖掉，时空的根本性质也不会有变化，仍然是奇异时空。

然而，挖掉奇点之后，时空中就不存在曲率为无穷大的点了，因此，仅仅用“曲率无穷大”来定义奇点是有缺陷的。他们注意到，虽然人们可以把奇点从时空中挖掉，但挖掉之后总会留下空洞，那么时空中任何一条经过空洞的曲线（世界线）都会在那里断掉。

于是，彭罗斯和霍金建议，干脆把奇点从时空中“去掉”，认为它们不属于时空（图8-2）。粗略地说，干脆把它们看作时空中的“空洞”。但是任何一个正常点也都可以从时空中挖掉，形成空洞，时空中的曲线到达这样的空洞当然也会断掉，不过，这种空洞可以用数学方法补上，而奇点处的空洞则由于曲率发散不可能补上。

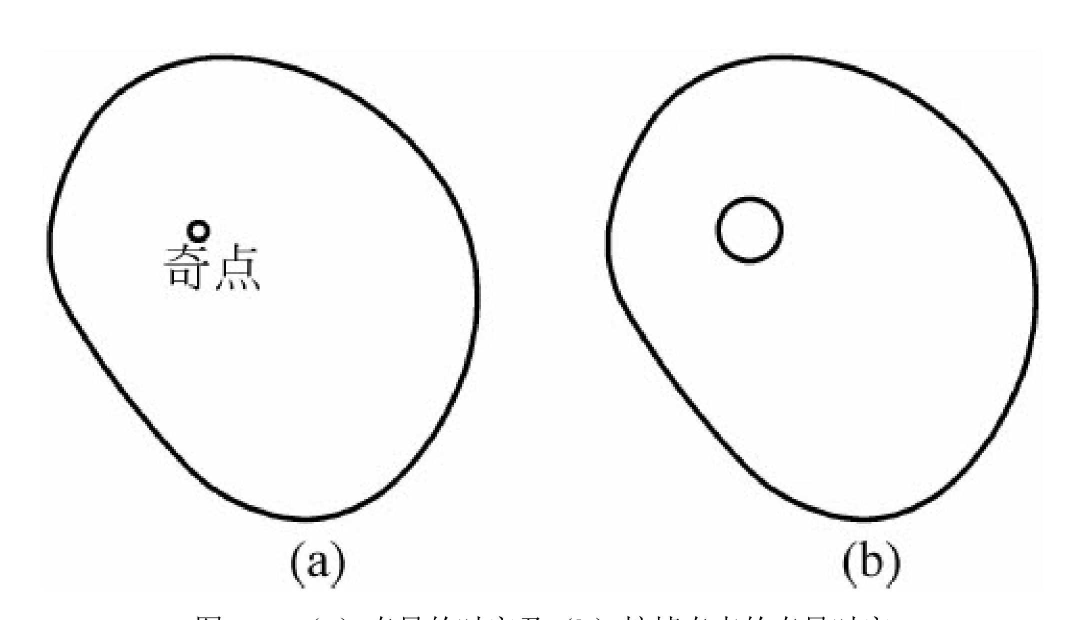


图8-2　（a）奇异的时空及（b）挖掉奇点的奇异时空

奇点：时间的开始与终结

于是，彭罗斯和霍金这样去证明他们的奇点定理。证明时空中至少存在一条具有如下性质的类光（光速）或类时（亚光速）世界线：它在有限的长度内会断掉，而且断掉的地方不能用任何手段修补，以使这条世界线可以延伸过去。

类空（超光速）世界线不在他们的考虑范围之内，因为这样的曲线描述超光速运动，而自然界不存在超光速运动的粒子。

类光世界线描述光子运动，类时世界线描述低于光速的质点的运动，例如电子运动、火箭运动以及我们人类可以进行的任何活动。总之，光速或亚光速世界线描述自然界存在的一切实际过程。

相对论研究表明，时空中的亚光速世界线的长度，恰恰是沿此线运动的质点（或火箭、或任何物体和人）所经历的真实时间（称为固有时间）。所以，按照彭罗斯和霍金的观点，奇点就是时间过程断掉的地方。

奇点定理的实质内容是：在因果性成立、广义相对论正确而且有物质存在的时空中，至少有一个可实现的物理过程，它在有限的时间之前开始，或在有限的时间之后终结。也就是说，至少有一个物理过程，它的时间有开始，或有终结，或者既有开始又有终结。换句话说，至少有一个时间过程，它的一头或两头是有限的。

总之，奇点定理告诉我们，时间不都是无穷无尽的。黑洞的内部，有一个时间的“终点”，即黑洞的奇点。白洞的内部，有一个时间的“起点”，即白洞的奇点。膨胀宇宙的时间有一个起点（大爆炸奇点），脉

动宇宙的时间，则不仅有一个起点（大爆炸奇点），还有一个终点（大挤压奇点）。

奇点定理的前提条件是无可非议的。奇点定理的证明过程，依据了现代微分几何和广义相对论的研究成果，经过了不少专家的反复推敲。看来，奇点困难无法摆脱。奇点定理不仅确认了奇点不可避免，而且指出奇点困难反映了时间的有始有终性。

下面，我们先介绍一些基本概念，然后介绍证明奇点定理的思路。

测地线与仿射参量

由于一般的世界线反映的不一定是质点（或光子）的自由运动，可能有外力作用，即反映的不一定是纯“时空”性质，而且一般世界线不易找到合适的参量来表征“长度”，彭罗斯和霍金在研究奇点时把注意力集中到测地线（即“短程线”）这类特殊的世界线上。

测地线是直线在弯曲时空中的推广，它是不受外力（万有引力不算外力）的自由质点和自由光子在弯曲时空中的运动轨迹，反映的是时空本性，而且测地线有一种很好的参量可以反映长度，那就是仿射参量。

类时测地线（自由质点的轨迹）的仿射参量可以看做固有时间（即沿此测地线运动的观测者亲身经历的时间）。类光测地线（自由光子的轨迹）的仿射参量虽然不能看做固有时间，但仍能很好地描述光线的长度。

如果有一根非类空测地线（即类时或类光的测地线），在未来或过去方向上，在有限的仿射长度内断掉，不能再继续延伸，那么，这根测地线就被认为碰到了时空的“洞”。如果这个“洞”补不上（例如，曲率发散处的“洞”就补不上），那么它就是奇点。

严格说来，“洞”不一定是一个点，可能是一个区域，而且此区域不属于时空，甚至可能不属于流形，个别情况还不属于拓扑空间。

注意，现代广义相对论认为，奇点本身不属于时空。奇点与无穷远点均不属于时空，区别在于伸展到无穷远点的光线或类时线长度无限，即光线的仿射参量和类时线的固有时间趋于无穷；而伸展到奇点的光线和类时线长度有限，即仿射参量或固有时间有限。

时空的因果结构

分别满足下述5个条件的时空，具有不同的因果结构，因果性一个比一个好。

（1）编时条件：不存在闭合类时线。即一个人或一个质点不能随着时间前进，又转回自己的过去。

人或质点不管在三维空间中静止还是运动，在四维时空中都会描出一条亚光速的世界线——类时线。此类时线描述了人或质点的“历史轨迹”和 “生活经历”。

如果此类时线闭合，就表明这个人或质点会回到自己的过去，影响过去的自己，从而改变自己过去的历史，造成因果性的破坏。编时条件就是禁止出现这种荒谬的情况。

（2）因果条件：不存在闭合因果线。即不仅没有闭合类时线，也没有闭合类光线。闭合类光线表示一条光线随着时间前进，会转回自己的过去，这同样会影响过去，破坏因果性。

（3）强因果条件：不存在闭合因果线，也不存在无限逼近闭合的因果线。

沿“无限逼近闭合的因果线”发展的人、质点或光子，不可能完全不影响自己的过去。

（4）稳定因果条件：在微扰下也不出现闭合因果线。即不存在闭合因果线，而且在对时空进行微扰的情况下，也不会导致原来不闭合的因果线闭合起来。

物质的存在和运动变化，不可能不对时空产生反作用，造成微扰。如果一有微扰因果线就闭合，这种时空的因果结构还是有问题的。

（5）整体双曲：时空存在柯西面。所谓柯西面是这样一张超曲面，时空中的任何一条因果线都必须与它相交，而且只交一次。

整体双曲时空被一张张柯西面充满。粗略地说，每张柯西面都可以看作该时空的一张“同时面”。而且，我们只要知道了任何一张柯西面上的全部数据，就可以知道整个时空的全部“历史”，所有的这些数据如何从过去演变而来，又如何继续发展演变。非整体双曲的时空都做不到这点。

所以许多人认为，真实的物理时空都应该是整体双曲的。整体双曲有可能是物理学对时空性质的要求。当然，对于这一点，学术界还有不同意见。

感兴趣的读者可参看梁灿彬与周彬合著的《微分几何与广义相对论》。

整体双曲的时空是因果性最好的时空。整体双曲的时空一定稳定因果，稳定因果的时空一定强因果，强因果时空一定满足因果条件，因果条件一定能推出编时条件。

闵可夫斯基时空和史瓦西时空都是整体双曲的。Reissner-Nordstrom时空（即带电史瓦西时空）是稳定因果的。转动轴对称的克尔时空和克尔-纽曼时空（带电克尔时空）则因果性很差，连编时条件都不满足，在奇环附近存在闭合类时线，沿此类时线生存的观测者，将不断地返回自己的过去。

能量条件

真实的时空，不应该一点能量都没有。能量条件就是给出时空中能量和压强存在的情况。

（1）弱能量条件

此条件表示能量密度ρ一定非负

$$\rho \geqslant 0 \quad 且 \quad \rho + p_i \geqslant 0 \quad (i = 1,2,3) \tag{8.1}$$

式中，p_i为压强（应力）。

（2）强能量条件

$$\rho + \sum_{i=1}^{3} p_i \geqslant 0 \quad 且 \quad \rho + p_i \geqslant 0 \quad (i = 1,2,3) \tag{8.2}$$

式中，ρ为能量密度，p_i为压强（应力）。强能量条件是说应力不能太负。事实上，在绝大多数情况，应力都是正的，所以一般情况下强能量条件反而比弱能量条件弱。但是，存在应力为负的情况，这时，强能量条件就比弱能量条件强了。

（3）主能量条件

$$\rho \geqslant | p_i | \quad (i = 1,2,3) \tag{8.3}$$

主能量条件是要求能量流不能超光速，且弱能量条件必须成立。从主能量条件可以推出弱能量条件。

共轭点

讨论奇点定理，需要用到测地线的共轭点的概念。我们来介绍一下共轭点。

测地线是直线在弯曲时空中的推广。大家都知道，平直时空中的两条直线只能有一个交点。弯曲时空则不同，两条测地线可能不只一个交点。例如地球表面的经线，它们都是大圆周，都是球面上的测地线（短程线），但它们在北极和南极各有一个交点，一共两个交点，这两个交点称为“共轭点”。

在一般的弯曲时空中，我们可以定义测地线汇，就是在时空的每一点画出一条测地线，它们汇成一束，在这束“线汇”中，每一点都有一根且只有一根测地线。

测地线汇中无限邻近的测地线，如果有两个交点，则称此二交点为共轭点（图8-3）。测地线汇，按照定义，是指过每一时空点有一根且只有一根测地线的情况。在测地线的交点，当然有两根以上的测地线。从这个意义上讲，共轭点是线汇的奇点，但它还不是时空的奇点。

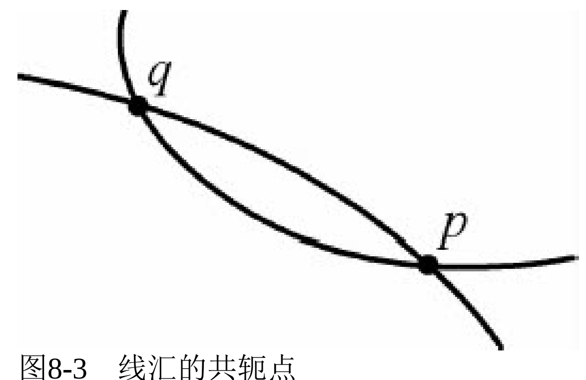


图8-3　线汇的共轭点

最长线：无共轭点的测地线

可以证明：不管是类时线还是类光线，两点之间长度取最大值的世界线一定是中间无共轭点的测地线。

前面我们曾经谈到，两点之间距离取极小值（或极大值）的线，一定是测地线（或称短程线）。这里我们又进一步看到，两点之间距离取极小（或极大）值的线，不仅必须是测地线，而且还要其上不存在共轭点，这是为什么呢？

我们用球面来举一个例子，大家就易于理解了。在地球表面，从北京到北极点最近的连线，一定是过这两点的大圆周（测地线），也即过北京的经线。

但是，从北京到北极点，沿这条经线有两条路可走，一条是从北京径直往北，到达北极点。另一条是从北京往南走，沿这条经线到达南极点，绕过南极后再继续向前，往北走，最终到达北极点。这两条路线都是沿同一条经线，也就是说沿同一个大圆周，同一条测地线。

显然，只有从北京出发径直往北的路径最短，从北京往南越过南极点再往北到北极的路径，不是最短的线。它们不都是大圆周吗？不都是测地线（短程线）吗？为何只有从北京径直向北的一条是最短线，往南的一条不是呢？

这是因为往南的一条上有共轭点，例如南极点就是与北极点共轭的点，共轭点的存在，使这段测地线不再是最近的距离。不经过南极点的那段经线上没有共轭点，所以只有从北京往北走，直达北极点的经线才是最短线。

奇点定理的证明思路

可以证明：

（1）在强因果时空中，不一定有最长线；如果有，则一定是无共轭点的测地线。

（2）在整体双曲时空中，一定有最长线，它一定是无共轭点的测地线。

另一方面，又可以证明：

如果广义相对论正确，强能量条件成立，并且时空中至少有一个存在物质的时空点，则测地线上在有限的仿射距离内必存在共轭点。

总之，因果性要求有最长线，即要求存在无共轭点的测地线。能量条件、广义相对论和物质的存在则要求测地线上一定有共轭点，而且是在有限的仿射距离内就出现共轭点。

如果时空同时满足上述因果性和能量条件，并存在物质，而且广义相对论正确，那就会导致矛盾的结论：测地线上既要有共轭点，又要无共轭点。

解决此矛盾的唯一出路是，测地线不能无限延伸，在出现共轭点之前，在有限的仿射距离内就断掉。也就是说，此测地线一定会遇到奇点，时空一定存在奇异性。

例如，有一个因果性很好的时空，在此时空中的任意两点p与q之间，必定有最长线，它一定是一条不存在共轭点的测地线，如图8-

4（a）所示。

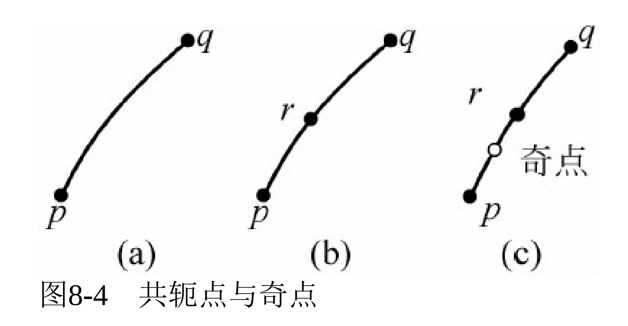


图8-4　共轭点与奇点

如果此时空是广义相对论场方程的解，满足能量条件，且存在一点儿物质，那么从p到q之间的测地线一定存在共轭点，例如图8-4（b）所示，图中r点即是与p点共轭的点。

因果性要求p、q之间无共轭点，能量条件等又要求有共轭点。这个矛盾如何解决呢？唯一的办法是认为此测地线从p出发后，在抵达共轭点r之前碰到了洞，断掉了，即碰到了奇点（如图8-4（c）所示）。

由此，就证明了奇点定理：如果广义相对论正确，能量密度非负，时空不完全是真空，因果性良好，则时空一定存在奇点。

我们看到，史瓦西时空、克尔-纽曼时空、膨胀宇宙模型中都有奇点。不过，闵可夫斯基时空和德西特时空没有奇点，这是因为它们是完全的真空，没有任何物质存在。

通常确认时空奇点有两个步骤：一是证明有非类空测地线在某处不可延伸。二是证明反映时空曲率的标量在该处发散，这种发散使得该处的时空不能被修补，以使测地线延伸过去。

对第二个步骤应该做一点说明，在广义相对论中描述曲率的量，有的是张量，有的是标量。张量在坐标变换下会发生变化，它的某些分量如果在一个坐标系中发散，变到另一个坐标系就有可能不发散。但标量的值与坐标系的选择无关，如果在一个坐标系中发散，那么无论你怎样变换坐标系，它都会保持发散。所以判断时空曲率是否出现发散，一定要用描述时空曲率的标量。

步入探讨奇点的殿堂

多数相对论专家相信，奇点困难是由于引力场没有量子化而造成的。奇点定理是经典广义相对论的结论。如果把引力场量子化，奇点困难可能会自动消失。

遗憾的是，引力场量子化的努力还远未成功。也有一些人由于种种原因不相信引力场量子化就能自然消除奇点困难。霍金本人则试图引入虚时间来化解奇点困难。而我在思考奇点之谜的过程中，走上了一条独特的道路。

1979年，中国科学界举行了纪念爱因斯坦诞生100周年的活动，在科学会堂的大会报告中，时任中国引力与相对论天体物理学会副理事长的郭汉英研究员介绍了彭罗斯与霍金的奇点定理。

这是我第一次注意到这个定理，它引起了我内心极大的震撼。物理学居然开始研究时间有没有开始和结束的问题，这一问题太重要了，它原本属于神学和哲学的范畴，现在居然进入了科学的范畴。

此后我开始注意有关奇点定理的各种介绍，翻阅了一些书籍和文献。后来梁灿彬先生在北师大用整体微分几何介绍现代广义相对论，把从芝加哥大学Wald教授那里学到的新东西介绍给中国相对论界。

我认真地听了梁先生的全部几个学期的讲座，记了8本笔记，并在与奇点定理有关的内容上反复琢磨。我经过不断阅读思考，逐渐加深了对这些问题的理解，产生了一些体会。

对奇点困难的另类思考

1980年前后我的主要注意力放在黑洞热性质的研究上，并不时在考虑热力学第零定律与“同时传递性”的关系。

当时，物理界都认识到时间的性质与热力学有关，但大家强调的只是“时间箭头”，只是热力学第二定律与时间流逝性的关系。

其实，物理界也早就知道能量守恒（热力学第一定律）与时间均匀性有关。只不过在谈论热力学与时间性质的关系时没有强调这一点，只是强调第二定律与时间箭头的关系。

在探索第零定律与时间测量之间的关系时，我注意到了热力学第二定律和第一定律也都与时间的性质有关。有时就想，热力学总共四个定律，前三个（第零、第一、第二定律）都与时间有关，第四个（即第三定律）是否也与时间性质有关呢？

我开始猜测，与第三定律有关的莫非就是奇点定理吗？“绝对零度的不可抵达性”真的和“时间有无开始与终结”有关吗？越想越觉得自己的推测可能有些道理，于是开始注意这方面的资料。

奇点伴随温度异常

我在对黑洞和奇点的长期研究中，注意到伴随奇点出现的一个重要物理特征：奇点总是伴随温度异常而出现。

在对黑洞和霍金热效应的研究中，我们注意到，这种效应依赖于坐标系（坐标温度）和观测者（固有温度）。凡是接触奇点的坐标系，都处于绝对零度或温度发散的状态；凡是有限温度的坐标系，都伸展不到奇点处。

例如，黑洞外部的观测者，接收不到来自黑洞内部的信息，更不可能看到位于黑洞内部的奇点或奇环。在他看来，任何落向黑洞的物体，或飞向黑洞的飞船，都会越走越慢，越来越发红（红移），越来越暗，最后冻结在黑洞的表面（事件视界）上，消失在那里的黑暗之中，永远也看不到它们落进黑洞。

因此，可以认为洞外观测者所用的坐标系（例如史瓦西坐标系）接触不到奇点。第六章的讨论还告诉我们，黑洞外面存在霍金辐射，因而外部观测者和他的坐标系处在有限温度的环境之中。已知的例子都告诉我们，有限温度的坐标系都接触不到奇点。

怎么才能使洞外的观测者能够看到奇点呢？办法是不断向黑洞注入电荷和角动量，使黑洞变成极端黑洞，内外视界重合，$r_+=r_-$，单向膜区成为一张薄膜，这时再增加一点电荷和角动量，单向膜区就会消失，事件视界不再存在，奇点（或奇环）就会裸露出来，称为“裸奇异”，这时位于洞外的观测者就会看见奇点了。也就是说，洞外观测者所处的坐标系就接触到奇点了。但极端黑洞处在绝对零度，这就是说，一个坐标

系要接触到奇点，必须首先破缺热力学第三定律，使自己达到绝对零度，才有可能进一步接触到奇点。

有人用温度格林函数（松原函数）研究过黑洞的温度。研究发现，如果假定覆盖整个史瓦西时空的克鲁斯卡坐标系处在绝对零度，用零温格林函数来描述，则变到史瓦西坐标系后，此零温格林函数将自动变为有限温度的松原函数，其温度恰为史瓦西黑洞的霍金辐射温度。这样就证明了史瓦西时空处在有限温度，即霍金辐射的温度。

由于黑洞霍金辐射的温度可用多种方法证明，所以上述讨论又反过来证明了克鲁斯卡时空（坐标系）确实处于绝对零度。

从第六章可以看出，绝对零度的克鲁斯卡坐标系可以接触史瓦西时空的内禀奇点（r＝0），但有限温度的史瓦西坐标系（有霍金辐射）则接触不到此内禀奇点。

此外，史瓦西黑洞在蒸发到最后时，其质量M越来越小，半径r＝2M也越来越小，温度

$$T=\frac{1}{8\pi K_{B}M} \qquad (8.4)$$

越来越高，在最后消失的一瞬间，$M\rightarrow 0$，$r\rightarrow 0$，$T\rightarrow \infty$。有人研究认为，在最后一瞬间，史瓦西黑洞的奇点会在消失前裸露，但这时它的温度已是无穷大了。

值得注意的是，有一大类奇点（类时奇点，例如R-N黑洞的奇点，如图8-5中的曲折线所示）是类时线不可能抵达的，只有类光线（图中虚线）或趋近类光的类时线（图中实线）才能抵达。梁灿彬与盖若什等人首先证明了这一点。还可以证明，这种类时线在趋近奇点时，加速度

将趋于无穷大。依据第六章介绍的安鲁效应，沿这种类时线运动的观测者（或物体）在到达奇点时，温度将发散。

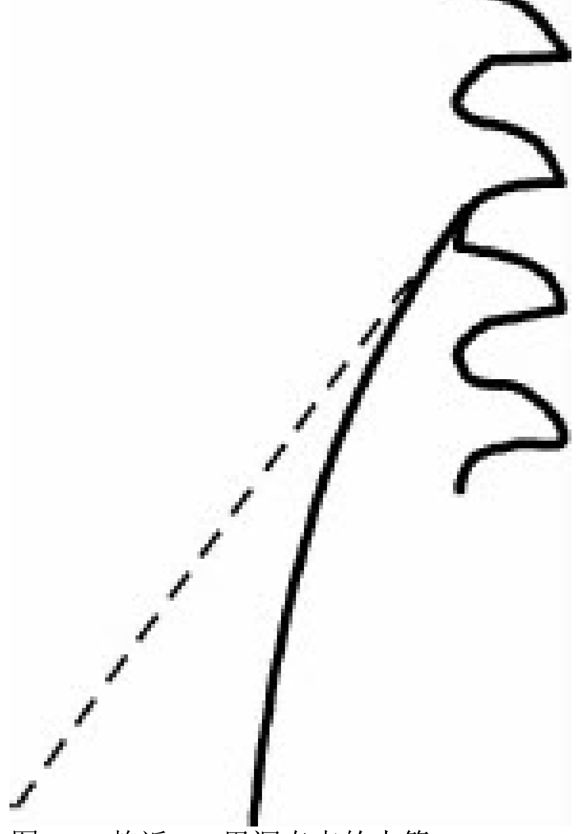


图8-5　趋近R-N黑洞奇点的火箭

用安鲁效应研究测地线的温度

我们还注意到，证明奇点定理所用的世界线都是测地线（类时、类光两种）。按照式（6.10）所示的安鲁效应，沿类时测地线（加速度为零）运动的观测者处于绝对零度。我们最近证明了类光测地线可以看作加速度为无穷大的类时线，按照安鲁效应，它对应温度发散的情况。

伦德勒曾经指出，平直时空中某种特殊的类光线，可以看作固有加速度为无穷大的类时线。图8-6为闵氏时空图。图中双曲线即伦德勒观测者的世界线，该观测者的固有加速度为有限值。研究表明，加速度越大，双曲线越趋近其渐近线。该渐近线在图中呈45°角，为类光线。当双曲线趋于其渐近线（类光线）时，沿此曲线运动的伦德勒观测者的固有加速度将趋于无穷大。所以，伦德勒得到上述结论。

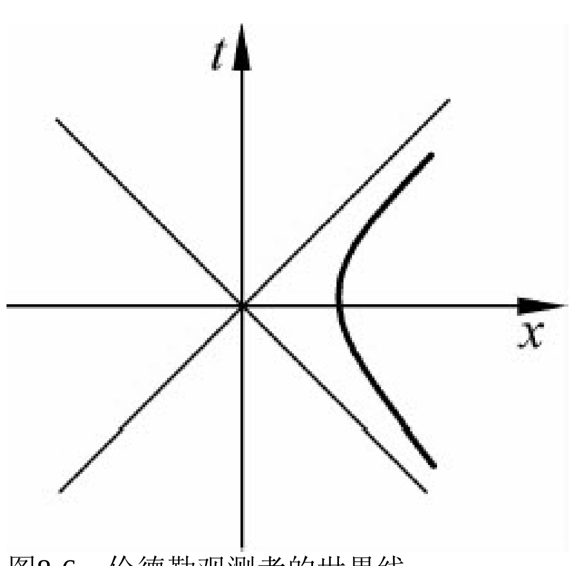


图8-6　伦德勒观测者的世界线

不过，这种特殊的类光线存在突变的拐点，相当于被镜子反射了一下，因而不是类光测地线。我们曾把伦德勒的这一结论，推广到弯曲时空中可以无限延伸的类光测地线。

下面我们将指出，这一结论对于存在共轭点的类光测地线也适用。这就是说，在奇点定理的证明中所使用的类光测地线（这种类光线会碰到奇点，不能无限延伸），确实可看作固有加速度为无穷大的类时线。

对类光测地线加速度的研究

众所周知，类光测地线不能用“固有时间”来描述，而只能用另一类仿射参量描述，因此不能直接对类光测地线定义加速度。我们证明的途径是，把类光测地线看作一簇类时线汇的极限线。在类时线上可以严格定义加速度，然后让这族类时线趋近作为极限线的类光测地线，把这样得到的极限加速度定义为类光测地线的加速度。

关于存在共轭点的类光测地线，霍金等人曾证明一条定理：设p，q是光滑因果线μ上的两点，不存在连接p，q两点的光滑单参因果曲线（因果曲线指线上任二点有因果联系的曲线，即类光线和类时线）族γ_μ（γ_0＝μ；当μ＞0时，γ_μ类时）的充要条件是：γ_0是一条类光测地线，且在p，q之间不存在与p共轭的点（图8-7）。

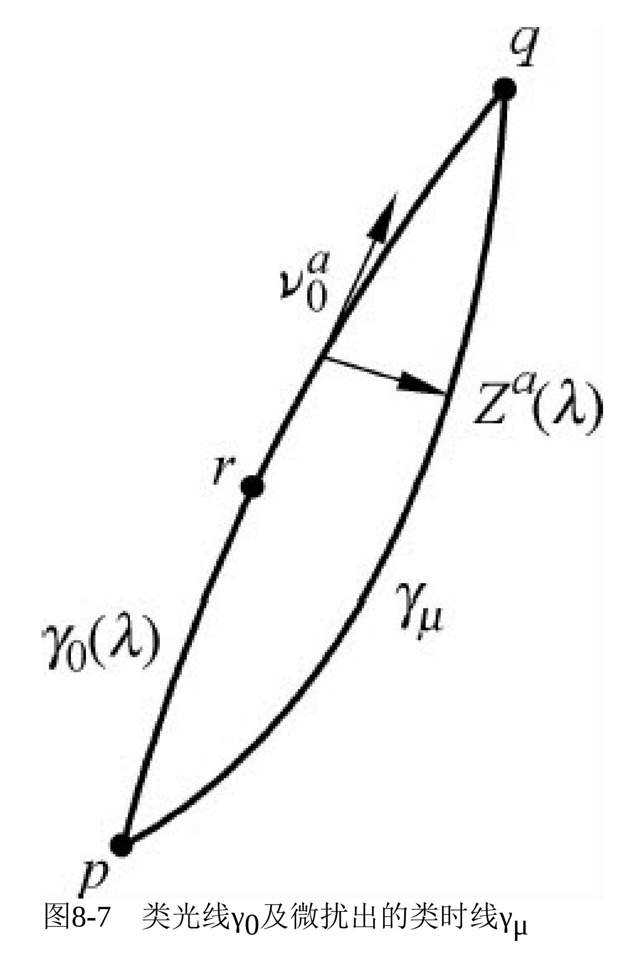


图8-7　类光线γ_0及微扰出的类时线γ_μ

从这条定理可知，当γ_0上存在共轭于p的点r时，一定可以从γ_0微扰出因果曲线族γ_μ。除γ_0为类光测地线外，γ_μ（μ＞0）都是类时线。不难看出，γ_0是类时线汇γ_μ的极限线。图8-7中ν_0^a为γ_0的切矢，Z^a为偏离矢量。

我们定义γ_μ上的加速度A，然后令γ_μ逼近γ_0，发现加速度A→＋∞。

这样，我们就证明了γ_0的加速度A发散。这就是说，有共轭点的类光测地线γ_0，可以看作固有加速度为无穷大的世界线。这是一个极具启发性的结果。

田贵花博士和我合写的相关论文已发表在美国的《数学物理》及欧洲出版的《经典与量子引力》等中外杂志上。

通常认为，自由光子作惯性运动，其固有加速度当然是零。现在我们看到一个惊人的相反结论，作惯性运动的光子的固有加速度居然是无穷大。这启示我们在光、惯性与时间的背后，存在重要的未知关系。光在相对论中已经处于核心地位，但从本节的讨论来看，我们对光的认识还非常不够，需要进一步深化。

奇点的证明与热力学第三定律冲突

大家注意，霍金和彭罗斯证明他们的奇点定理时，是用测地线做工具的。奇点定理表明，至少有一条光速或亚光速的测地线会在有限的时间（即测地线长度）内碰到奇点而断掉。所谓测地线，就是弯曲时空中的“直线”，沿测地线运动的物体，作的是惯性运动。

由安鲁效应可以推测，沿亚光速测地线运动的物体处在绝对零度。现在我们又证明，沿光线（类光测地线）运动的光子加速度为无穷大，依据安鲁效应可以把它们的温度视作无穷大。

对于通常的系统，热力学第三定律指出，不能通过有限次操作把系统的温度降低到绝对零度。因此，对于通常的热力学系统，它的温度定义在无穷大和绝对零度之间。研究表明，能量有限、能级数目也有限的系统，存在负温度，它的温度定义在负零度（－0K）与正零度（＋0K）之间。这种系统称为负温系统。

在负温系统中，热力学第三定律表为，既不能通过有限次操作把系统温度降到正零度，也不能通过有限次操作把系统温度升高到负零度。对于通常的热力学系统，第三定律只说了下限绝对零度不可抵达，未涉及上限，但上限“无穷大”显然也不可能抵达。

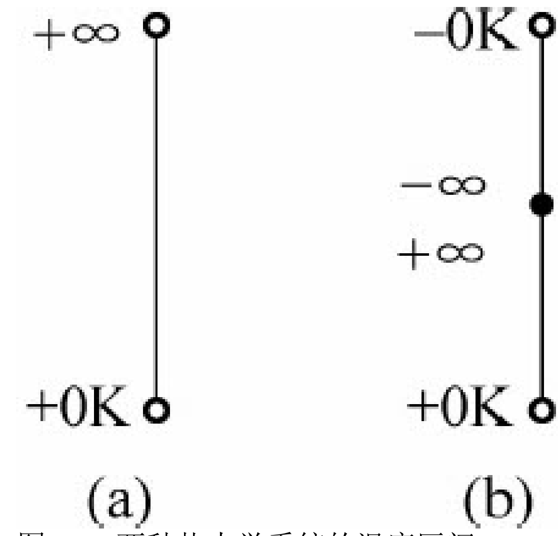


图8-8　两种热力学系统的温度区间

（a）常温系统；（b）负温系统

实际上，两类系统的温度都定义

在开区间上，温度的上限（无穷大或负温度系统的－0K）与下限（绝对零度）均不能通过有限次操作达到，所以可以一般性地把第三定律推广到包括上限的情况。因此，我们认为，奇点定理是在违背热力学第三定律的情况下证明的。

上述情况提示我们，奇点的出现或达到奇点，往往伴随温度异常（绝对零度或无穷大）的情况出现。奇点的出现是违背第三定律造成的，也就是说，热力学第三定律可能会不容许时间有开始和终结。

前面谈到，许多人认为“宇宙监督”就是第三定律，第三定律会阻止奇点裸露。现在看来第三定律不仅会阻止奇点裸露，而且很可能会干脆阻止奇点存在。

彭罗斯和霍金把奇点看作时间的开始或终结，在认识上是一个重大的进展。奇点定理说，时间一定有开始或终结。现在我们看到，奇点定理与热力学第三定律冲突，因此我们推测第三定律将保证不存在奇点，保证时间没有开始和终结，因此时间应该是无限的，无始无终的。

我们对这些问题的有关科研论述，刊登在《中国科学》等杂志，以及作者的科研专著中。

第九章　时间测量的疑难与探索

法国数学家庞加莱认为“时间必须变成可测量的东西，不能被测量的东西不能成为科学的对象”。

然而，时间测量问题要远比人们想象的复杂得多。主要困难还不是测量的技术，而是测量的理论依据。下面我们就来叙述和讨论这一问题，读者会从中悟出深刻的哲理。

用周期运动度量时间

作为“绵延”的时间，有“持续性”和“流逝性”双重性质。

“流逝性”如何度量，在自然科学中尚无公认的方法。虽然普列高津等人有不少重要的探讨，虽然可以考虑用“不可逆熵”的产生率来进行度量，但离形成真正的科学定义尚有不小的距离。

“持续性”的度量则从古就有。从人类文明诞生的时候起，古人就用各种周期运动来度量时间，例如地球自转、公转引起的星空的周期变化，月亮的周期性圆缺，日影高度的周期变化，以至后来的单摆周期运动等。

近现代的各种钟表，都是用周期运动来度量时间，即度量时间的“持续性质”。以后我们谈到时间的测量或度量，都是专指对时间“持续性”的测度。对于目前尚不清楚的“流逝性”的度量，我们暂不讨论。

综上所述，人类长期以来是通过运动，主要是周期运动来度量时间。亚里士多德就明确说过：

“时间是运动的计数。”

“时间是运动和运动持续量的尺度。”

似乎人们只要造出统一的、高质量的按某种科学规律的周期运动来计量的钟，再把这些钟分置到世界各地，度量时间的问题就彻底解决了。然而，深入的哲学思考却使这似乎不成问题的问题成了大问题。

度量时间需要先做“约定”

牛顿在阐述自己的绝对时空观时就明确提出，绝对时间是客观存在的，均匀流逝的，但却是不可测量的。

通常悉知的可测量的时间，是对运动延续的度量，只不过是绝对时间的代替物，是一种相对时间，表观时间。牛顿清醒地认识到：“可能并不存在一种运动可以用来准确地测量（表观）时间”，“所有的运动可能都是加速或减速的”。

与牛顿同时代的著名的哲学家洛克指出：时间是对绵延长度的度量。绵延只能用周期运动作单位进行度量，然而“绵延中任何两部分，我们都不能确知是相等的”。我们只能假定，周期运动的每一个周期都是相等的，才能对时间进行度量。

洛克的意思是，我们无法知道周期运动的每一个周期都是相等的。造成这种局面的原因在于时间与空间不同。在洛克那个年代，人们认为空间是永存的，尺子也是不变的。我们只要选择一把尺子，把它的长度作为标准长度，就可以反复测量同一个长度。

因此人们认为空间的度量不成问题。然而时间却不同，时间具有一去不复返的性质，“过去”已经不存在了，“未来”还没有来临。

我们无法把周期运动的一个周期移动到另一个周期去进行比较，因此，各种周期的相等只有靠“约定”（即“规定”）。只有“约定”了某种周期运动的各个周期相等，我们才能测量时间。

用运动定律度量时间——“好钟”

18世纪著名的数学家欧拉提出一个新思路：用运动定律来确认周期运动的各个周期相等。他在《时间和空间的沉思》一书中写道：如果以某个给定的循环过程为单位时间，而发现惯性定律成立的话，这个过程就是周期的。即每次循环都经历相同的时间，或者说各个时间周期相等。

欧拉所处的时代，相对论尚未诞生，大家认为空间的测量不成问题。尺子可以来回移动，反复测量。

在标度好了距离的空间，使用尚需考察的钟表来计量时间，如果把这样测得的时间与空间距离相配，在任何相等的时间段内，不受外力的质点都走过相等的距离，那么就可以认为这个钟是“好钟”，它的各个周期是相等的。

欧拉的思想后来被进一步发展，认为“好钟”可以这样定义：用它标度的时间，应该保证牛顿三定律成立，麦克斯韦电磁理论成立，能量动量守恒定律成立，等等。一句话，应该保证物理规律简单！

然而，怎么严格定义“物理规律简单”呢？我们如何确认现在已知的物理规律表达式已经是最简单的了？这个问题很难回答。

相对论诞生之后，人们逐渐认识到不仅时间的测量有问题，空间的测量也存在问题。一根尺子在不同的地方，长度是否一样？尺子在移动过程中长度会不会改变？都成了需要深思的问题。

庞加莱的推测——“约定光速”

哲学家们在探索“时间本质”上所发挥的激情，使时间测量问题更加混乱。不少哲学家认为时间与空间不同，时间应该属于精神世界。有的哲学家干脆认为时间的度量只能靠“直觉”。然而什么是“直觉”，也很难说清楚，似乎只能意会，不能言传。

哲学家的聪明才智虽然给了科学工作者很多启示，但上述把时间归入“精神世界”，把时间度量归入“直觉”的看法，似乎无助于自然科学工作者对时间性质的研究。

针对上述导致“混乱”的观点，庞加莱在相对论诞生前夜（1900年前后）发表了一些重要看法。庞加莱认为时间的测量分为两个问题，一个是如何确定“异地时钟”的“同时”，另一个是如何确定“相继时间段”的“相等”。他认为这两个问题的解决不能靠“直觉”，而应靠“约定”。

那么，约定什么呢？1898年，庞加莱在《时间的测量》一文中猜测，应该把“光速各向同性而且是一个常数”作为一条公理（即约定）。他讨论了用交换光信号来确定两地时间“同时”的问题。

1905年，他又在《科学的价值》一书中再次强调了他对“约定”光的传播性质的观点：“光具有不变的速度，尤其是，光速在所有方向都是相同的。这是一个公设。没有这个公设，便不能试图测量光速。”

正是这些见解，引导爱因斯坦走上了发现相对论的道路。

爱因斯坦遇到难解之谜

科学史的研究表明，在相对论的第一篇论文发表之前很久，爱因斯坦就已认识到“相对性原理”和“麦克斯韦电磁理论”是应该坚持的基本原理。他也已认识到这将导致电磁理论与参考系无关，以及由此引起的光速与参考系无关的结论，即所谓“光速不变性”。也就是说爱因斯坦已经抓住了相对论的基础。

那么他为什么一直没有建立起相对论呢？爱因斯坦1922年在日本京都的一次即兴演讲道出了其中的原委。他回忆了大约在1905年5月与朋友贝索的一次讨论，当时爱因斯坦正被一个问题卡住。这个问题就是“光速不变性”（即光速与观测者相对于光源的运动速度无关），似乎与力学中的速度叠加法则（平行四边形法则）相矛盾。这个难题爱因斯坦思考了几乎一年，然而毫无结果。他觉得“这真是个难解之谜”。

爱因斯坦在京都演讲中回忆道：“这时，伯尔尼的一个朋友（贝索）意外地帮助了我。那是一个明媚的日子，我去访问他，与他进行了如下的谈话：‘最近我有个难以理解的问题，所以今天我把问题带到这里来想跟你讨论。’我们谈了很多，我突然明白了。第二天我又去看他，开口就说：‘谢谢你，我已经完全解决了这个问题。’我解决的实际上就是时间概念，也就是说，时间不可能被绝对地定义，时间和信号速度之间存在着不可分离的联系。”

庞加莱对爱因斯坦的启发

在专利局工作时，爱因斯坦和他的朋友们组织了一个自称为“奥林匹亚科学院”的自由读书与讨论的“俱乐部”。他们曾一起读过并讨论过庞加莱的文章。看来这次与贝索的谈话使爱因斯坦回忆起了庞加莱关于时间与光速关系的论点，这给了他重要的启示，解决了那个被卡住的问题。

几周后爱因斯坦关于相对论的第一篇论文《论运动物体的电动力学》就投给了杂志社，文章后面，爱因斯坦向贝索致谢，“感谢他提出的一些有价值的建议。”

需要指出的是，爱因斯坦从来没有谈到过庞加莱在这方面对他的启发，也没有强调过他在“奥林匹亚科学院”的活动中阅读、讨论过庞加莱的著作。他只是一再强调他读过马赫的书籍，一再强调马赫对他的影响。然而，他在“奥林匹亚科学院”中的伙伴们后来回忆过他们一起阅读庞加莱作品的情况，谈到阅读庞加莱文章时的激动与兴奋，这种情绪一直感染了他们几个月。

爱因斯坦受到过庞加莱的启发应该是显然的，但是他为什么不谈这一点呢？这可能是由于他与庞加莱关系不太好所致。

爱因斯坦与庞加莱只见过一次面，那是在第一次索尔维会议上。当时庞加莱已是举世闻名的数学大师，爱因斯坦只是一个初出茅庐的新秀。爱因斯坦本指望庞加莱会支持他的相对论，但会后他十分沮丧，对他的朋友说：“庞加莱根本不懂相对论。”

后来，苏黎世大学想聘爱因斯坦去当教授，征求庞加莱的意见，庞

加莱写了如下回复："爱因斯坦先生是我所知道的最有创造思想的人物之一，尽管他还很年轻，但已经在当代第一流科学家中享有崇高的地位。……不过，我想说，并不是他的所有期待都能在实验可能的时候经得住检验。相反，因为他在不同方向上摸索，我们应该想到他所走的路，大多数都是死胡同；不过，我们同时也应该希望，他所指出的方向中会有一个是正确的，这就足够了。"

总之，庞加莱对爱因斯坦评价不高，从来没有表示过赞同相对论。而且不久之后，庞加莱就去世了，没有来得及改变自己的看法。

下面，我们将清楚地看到，庞加莱"约定"光速的观点，对爱因斯坦建立相对论的影响。

爱因斯坦的突破：“约定光速”来定义“同时”

“异地时钟的校准”和“相继时间段（绵延）的测量”是时间研究中的重大问题。庞加莱认为这两个问题相互关联，而且只有通过“约定”才能加以解决。他推测通过“约定”真空中光速的各向同性有可能解决上述问题。

爱因斯坦在他的相对论中正是用“约定光速”的方式，定义了异地事件的“同时”。由于物理学是一门实验的科学、测量的科学，有关时间度量的任何约定，都必须使定义在测量上有可操作性。

为此，爱因斯坦建议“约定”真空中的光速均匀各向同性，而且是一个常数。我们从这一约定中，不难看到庞加莱猜想的影子，爱因斯坦把庞加莱的猜想，具体实践到了物理理论中。

在相对论的开创性论文《论运动物体的电动力学》中，爱因斯坦给出了“同时性的定义”。他写道：

“如果在空间的A点有一个钟，在A点的观察者只要在事件发生的同时，记下指针的位置，就能确定A点最邻近的事件的时间值。若在空间的另一点B也有一个钟，此钟在一切方面都与A钟类似，那么在B点的观察者，就能测定B点最邻近处的事件的时间值。

但是若无其他假设，就不能把B处的事件同A处的事件之间的时间关系进行比较。到目前为止我们只定义了‘A时间’和‘B时间’，还没有定义A和B的公共‘时间’。”

爱因斯坦接着写道：

“除非我们用定义规定，光从A走到B所需的‘时间’等于它从B走到A所需的‘时间’，否则公共‘时间’就完全不能确定。

现在令一束光线于‘A时刻’t_A从A射向B，于‘B时刻’t_B又从B被反射回A，于‘A时刻’t'_A再回到A（图9-1）。

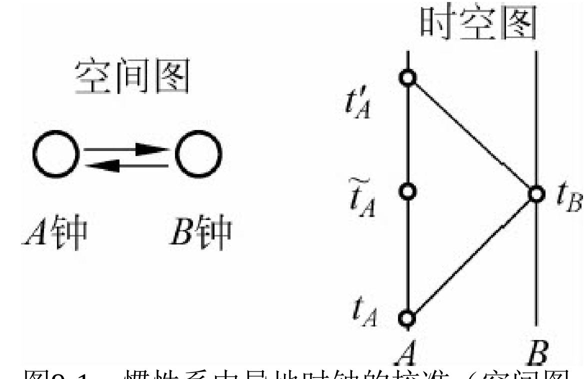


图9-1　惯性系中异地时钟的校准（空间图与时空图）

按照定义，两钟同步的条件是

$$t_B - t_A = t'_A - t_B \qquad (9.1)$$

我们假定，同步性的这个定义是无矛盾的，能适用于任何数目的点，并且下列关系总是成立的：

（1）假如B处的钟与A处的钟同步，则A处的钟与B处的钟也同步。

（2）假如A处的钟与B及C处的钟同步，则B、C两处的钟彼此也同步。

这样，借助于某些假想的物理实验，我们解决了如何理解位于不同地点的同步静止钟这个问题，并且显然得到了‘同时’或‘同步’的定义，以及‘时间’的定义。”

爱因斯坦又写道：“根据经验，我们进一步假设，令

$$\frac{2AB}{t'_A - t_A} = c \qquad (9.2)$$

是个普适恒量，即在真空中的光速。”

式（9.1）可改写为

$$\frac{t_A + t'_A}{2} = t_B \tag{9.3}$$

爱因斯坦就把A钟的时刻

$$\tilde{t}_A = \frac{t_A + t'_A}{2} \tag{9.4}$$

定义为与B钟的t_B同时的时刻。在平直时空的惯性系中，爱因斯坦用这种方法定义了异地静止时钟的“同时”。在操作过程中，他上面提到的几点假设都没有出现矛盾。

朗道的发现："同时的传递性"需要条件

然而，后来的研究却出人意料，人们惊讶地发现，如果在平直时空中采用非惯性系，或在弯曲时空中采用任意的曲线坐标系，则爱因斯坦的假设（2）不一定成立。研究发现，只有在时轴正交系（时间轴垂直于三个空间轴）中，"同时"才具有传递性（即假设（2）成立），才能在时空中建立"同时面"，定义统一的时间，使各点的钟保持"同时"和"同步"。

下面我们介绍一下朗道等人关于"同时"传递性的讨论，即对爱因斯坦所提的假设（2）在什么条件下成立的讨论。

爱因斯坦的假设（2）说，在任何一个惯性系中固定三个钟，如果用上面的方法把A、B两个钟对好，再把B、C两个钟对好，那么A、C两个钟就自然对好了。这表示"同时"这个概念具有传递性，全时空可以定义统一的时间。此结论与人们的常识一致，因此没有引起更多的兴趣。

然而朗道等人发现，在弯曲时空中（以及平直时空的非惯性系，例如在转动的圆盘上）却未必一定能做到这一点。在弯曲时空的一个参考系中，如果放置三个固定钟，同样可以用爱因斯坦建议的方法来"对钟"。可以把A、B两个钟对好，再把B、C两个钟对好，但是，这时A、C两个钟却往往对不上（图9-2）。

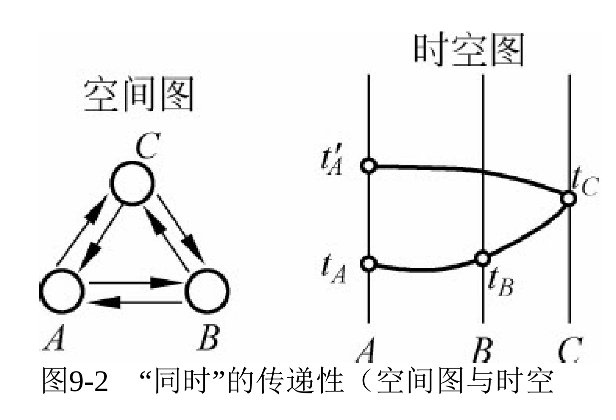


图9-2 "同时"的传递性（空间图与时空图）

这表示“同时”这个概念不具有传递性，不能在全时空定义统一的时间。朗道等人证明，只有在时间轴与三个空间坐标轴都垂直的情况下，即所谓“时轴正交”的情况下，A、C两个钟才能自然对好，“同时”才具有传递性，才能在全时空定义统一的时间。

朗道等人给出的时轴正交条件是

$$g_{0i} = 0, \quad i = 1,2,3 \tag{9.5}$$

我们在第五章中指出，度规的g_{0i}分量为零，表示时间轴与空间轴x^i垂直。“时轴正交”是指时间轴与三个空间轴都垂直，即g_{01}、g_{02}、g_{03}均为零的情况。

狭义相对论通常使用以直角坐标描述的惯性系，时空的四个坐标轴均两两垂直，当然时轴正交，“同时”自然具有传递性。所以，爱因斯坦提出的假设（2），在狭义相对论的研究中没有出现问题。

但是，广义相对论中的坐标系是任意的曲线坐标系，一般都不会时轴正交。不过，在大多数时空中，都可以找到一个时轴正交的坐标系来做参考系，在这个参考系中“同时”具有传递性，可以定义统一的时间。然而，如果在一个时空中找不到这样的时轴正交系，那么就不可能在此时空中定义统一的时间。

因此，在相对论中“同时”这个概念不是在任何参考系中都具有传递性的。也就是说，不是在任何参考系中，都能使静止在各点的钟“同时”或“同步”，这就是说，不是在任何空间中，都能建立统一的时间。广义相对论明确地给出了“同时”具有传递性的条件-时轴正交，就是时间轴必须与三个空间轴都垂直，三个空间轴之间是否相互垂直，没有关

系。

突发奇想

当我在刘辽先生的“广义相对论”课上学到朗道的“对钟理论”时，感到十分震撼：自然界中居然存在这样的怪事！A钟与B钟对好，B钟再与C钟对好，C钟却与A钟对不上。这太令人匪夷所思了！

在震惊之余，我不禁去想，自然界中还有没有类似的情况呢？我突然想到了热力学第零定律。第零定律告诉我们“热平衡具有传递性”。三个物体，如果A与B达到热平衡，B与C达到热平衡，A与C就自然达到了热平衡。

我从小就喜欢胡思乱想，这时突发奇想：“同时具有传递性”是否和热力学第零定律等价呢？当时我主要在跟随刘辽先生研究黑洞和引力波，但这个念头不断出现在我的脑海中，我终于决定不妨试一试，看看能否证明二者等价。

要进行这一论证，首先要找到合适的数学物理工具，这一工具必须能在“时间”和“温度”之间建立桥梁。于是在主要工作之余，我开始寻找这一桥梁。

不久我就选择了“温度格林函数”，即松原函数。我不是专门研究统计物理和热力学的，但在研究黑洞热辐射时，接触到过松原函数，对它有一点了解。在松原函数的参量中有温度，还有与时间有关的量。

自此我就投入了对此问题的研究，很快发现，在松原函数中，与温度相关联的不是“时刻”，而是“时间周期”（实际上是虚时间的周期）。我觉得，这样看来，如果“时间”与“温度”真的有关联，那么与热力学第零定律等价的大概不会是“时刻”的传递性，而可能是“时间周期的传递

性”，也即“钟速快慢”的传递性。

对钟的新等级：钟速同步传递性

于是，我认为应该引入一个新的概念：“钟速同步的传递性”，并找出其成立的条件。这就是说，我不要求A、B、C三个钟的时刻对好，只要求它们的快慢对好。也就是说，不要求三个钟的指针总是指同一时刻，只要求三个钟的钟速能够总“同步”，能够总走得一样快。显然，这应该是一个比朗道的“对钟”等级，要宽松的等级。

所谓钟的快慢，就像图9-3中线段的长短，如果这一段$t_{A2}-t_{A1}$等于$t_{B2}-t_{B1}$，$t_{B2}-t_{B1}$等于$t_{C2}-t_{C1}$，是不是转回来的这一段$t'_{A2}-t'_{A1}$和原来这一段$t_{A2}-t_{A1}$是一样长的。如果是一样长的，就是“钟速同步具有传递性”。

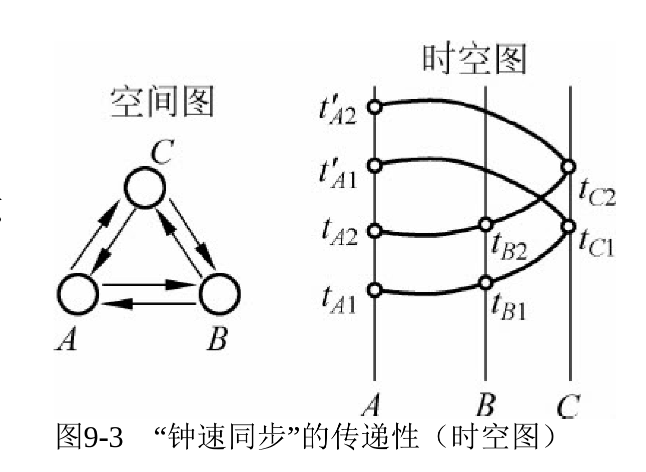


图9-3　“钟速同步”的传递性（时空图）

我按照爱因斯坦和朗道的对钟方案，沿着它们的思路，研究了“钟速同步的传递性”，给出了这一传递性成立的条件

$$\frac{\quad}{x^0}\left(\frac{g_{03}}{g_{00}}\right)=0 \qquad (9.6)$$

式中$x^0=ct$。

显然，此条件弱于朗道给出的“同时具有传递性”的条件式（9.5）。式（9.5）成立的时空，式（9.6）一定成立，反之则不一定。这就是说，“同时具有传递性”的时空，“钟速同步”一定具有传递性，反之则不一定。

直观一点说，就是如果静止于空间各点的钟，总是指着相同的“时刻”，你的钟3点，他的钟也3点，大家都是3点；你的钟4点，他的钟也4点，大家都是4点。这种情况下，各个钟的快慢必定相同。

反过来，各点的钟快慢都相同，并不一定各钟的指针都指着相同的时刻，只表示它们指针的时刻一定总保持相同的差值。

“钟速同步传递性”等价于热力学第零定律

有了“钟速同步传递性”这一概念及其成立条件式（9.6）之后，我就利用松原函数进一步探讨了“钟速同步传递性”与“热平衡传递性”之间的关系。研究表明，二者是等价的，“钟速同步”具有传递性的时空，热力学第零定律一定成立，反之亦然。

我们看到，只有在热力学第零定律成立的参考系中，才能在空间各点建立“速率”相同的时钟，即保证位于空间各点的静止钟能走得一样快，总是保持“同步”。

不过，这还不能保证静止于空间各点的钟做到“同时”。那是因为保证“同时”具有传递性的条件式（9.5）比式（9.6）更苛刻。式（9.6）只是式（9.5）的必要条件而不是充分条件。

爱因斯坦当年的论文没有区分钟的“同时”和“同步”这两个概念，我们的研究表明，这两个概念实际上有区别。做到“同步”的钟，并不一定指着同一时刻；但做到永远保持“同时”的钟，一定保持同步。

式（9.5）成立的参考系，时轴正交。在其中“同时具有传递性”，因而可以在整个空间定义统一的时间，在几何上画出同时面。这样的时空，式（9.6）必定成立，“钟速同步”一定具有传递性，热力学第零定律一定成立。

反过来，热力学第零定律成立的时空，一定能在空间各点建立相同的温标，静止于空间各点的钟也可以调整到“同步”，有统一的钟速，但还不一定能有统一的时刻，即不一定能建立同时面。

从1985年开始，我把这一工作写成论文，先后发表在《中国科学》等国内外杂志上，以及科研著作中。从1988年开始，又在我讲授的“广义相对论”课中讲到了上述工作，并把式（9.6）写入了自己编写的讲义。这套讲义在北京师范大学使用多年，后来又在清华大学讲课时使用过，最后由清华大学出版社以《广义相对论基础》的书名正式出版，不过那已是2010年的事情了。

1996年前后，北京师范大学的一位研究生高思杰在听了我的课后，认为我搞的这个研究工作有道理，就做了进一步的研究和发展，并与中科院数学所的邝志全研究员、北京师范大学的梁灿彬教授合作发表了一篇论文，确认了“钟速同步”是一个新的对钟等级。

现在，关于“钟速同步传递性”的研究成果，已出现在梁灿彬先生和周彬博士合写的《微分几何与广义相对论》一书中。

不过，他们在公开发表的文章和书籍中只是对“钟速同步传递性”发表了意见，未对此传递性是否与第零定律有关发表意见。

此后，我又曾多次回到上述问题的研究，并用“普朗克黑体谱”和“测不准关系”对第零定律与“钟速同步传递性”的关系进行了新的论证。

总之，我们的研究表明，热力学第零定律等价于“钟速同步”具有传递性，或者说，第零定律保证时空中一定存在一个“钟速同步具有传递性”的参考系。也就是说，第零定律是保证“同时”具有传递性的必要条件，或者说，保证时空中一定存在一个时轴正交系（因而在空间各点可以定义统一的时间）的必要条件。

所以，“同时”这个概念，并不是在任何空间中都存在的，只有在热

力学第零定律成立的空间中，它才可能存在。

时间这个概念，并不是在任何时空中都可以统一定义的，只有在热力学第零定律成立的空间中，才可能对空间各点定义统一的时间。粗略地说，热力学第零定律告诉我们，“同时”是可以定义的，或者说，时间是可以在空间各点统一定义的。

在热力学中，第零定律的作用，是保证温度可以定义。我们惊讶地发现，它也保证时间可以定义。这是一个有趣的结论。

那么，为什么以往没有人注意到这个问题呢？这是因为物理学的各个领域，除去广义相对论外，都不考虑时空弯曲，都只在狭义相对论和惯性系的范围内讨论问题，所用的坐标系都是时轴正交系。热力学定律也不例外。因此以往很少有人注意非惯性系和时空弯曲对热力学的影响。

有关“钟速同步传递性”等价于热力学第零定律的论述，后来收入了我所写的科研专著和教材中。

绵延的相等："时间段"相等的定义

庞加莱认为"异地时钟的同时"和任何一个时钟的"相继时间段（绵延）的相等"是时间测量中的两个重大问题。他认为这两个问题相互关联，而且只有通过"约定"才能加以解决。他推测通过"约定"真空中光速的各向同性有可能一起解决上述两个问题。

我非常赞同庞加莱的设想，即对光速传播性质的约定，应该是全部时间测量的基础，不仅"异地时钟的同时"，而且同一时钟"相继时间段的相等"都应该能通过"约定光速"来加以解决。

然而，爱因斯坦和朗道虽然用这一约定讨论了异地时钟同时的问题，但他们都没有讨论同一时钟的"相继时间段相等"应如何定义的问题。

前面提到过，对于"相继时间段的相等"，物理学中使用的是所谓"好钟"的概念。该定义源于欧拉的思想：如果以某个给定的循环过程为单位时间，而发现牛顿第一定律成立，这个过程就是周期的。

现代广义相对论中采用了欧拉的思想，认为一个"好钟"所走的时间，应该保证惯性定律成立，自由质点在局部时空区的时空轨迹应该是直线。这一思想还被进一步发展："好钟"的计时应保证物理规律简单，例如牛顿定律成立，麦克斯韦电磁理论成立，能量守恒定律成立，等等。

因此，现代物理学中时间与空间的测量，建立在两个约定的基础上。一个是约定光速均匀各向同性，而且是一个常数c，另一个是约定存在保证物理规律简单的"好钟"。在这两个约定的基础上，可以定义不

同空间点的钟“同时”或“同步”，还可以定义绵延的相等，并进一步用光速乘时间，定义空间距离。

但是，什么叫物理规律简单是个很难说清楚的问题。要求在局部惯性系中惯性定律成立，则必须事先定义“标准尺”，有了正确的空间距离，才能通过惯性定律验证钟的好坏。

然而，在广义相对论和现代物理学中，空间距离是用“约定的光速”乘上光传播这段距离的时间来定义的。我们看到，定义“时间”要用到“距离”；定义“距离”又要用到“时间”，这里面存在逻辑循环。因此“好钟”的定义有它的内在矛盾。

前面还谈到，我们建议了一个新的对钟等级：我们沿用爱因斯坦-朗道采用的对真空中光传播性质，即“光速各向同性而且是一个常数”的约定，给出了钟速同步具有传递性的条件。满足这一条件的时空，虽然不一定有“同时面”，但在全时空可以有统一的“钟速”。在相关论文中，我们强调的是异地时钟的钟速同步。

下面将指出，通过我们给出的钟速同步具有传递性的条件，不仅可以解决“异地时钟钟速同步”的定义问题，而且可以解决同一时钟“相继时间段相等”的定义问题。我们的这一研究结果，补充并发展了庞加莱和爱因斯坦等人关于时间测量的理论。

“约定光速”可以定义“相等的时间段”

大约在2005年左右，在参与“纪念相对论发表100周年”的宣传活动时，我重新阅读了爱因斯坦创立狭义相对论的第一篇论文《论运动物体的电动力学》及庞加莱的《科学与假设》、《科学的价值》等书籍，再次注意到他们对时间测量问题的论述，特别是物理学中对解决“异地时钟同时”和“相继时间段相等”的不同做法。

我想，是否能像庞加莱预期的那样，在“约定光速”的前提下，像解决“异地时钟同时”一样，来解决“相继时间段相等”的问题呢？

这时我回忆起当年自己提出“钟速同步传递性”这一概念时，有人问我，既然不同地点的钟可能指着不同的时刻，你谈的同步的“钟速”是哪个时刻的呢？我思考后回答说是“任何时刻”，我指的“钟速同步”，是说这些钟任何时刻都同步。对方大概觉得此答复还可以，就不再问了。

想到此，我沿着这一思路继续琢磨，既然“任何时刻”钟速都同步，如果把“对钟”操作持续一圈，“对”回到原来的钟，岂不就是同一时钟的“相继时间段相等”吗？

请大家看图9-3，（$t_{A2}-t_{A1}$）和（$t'_{A2}-t'_{A1}$）不就是A钟在不同时刻的两个“时间段”吗？在此图中，把时间段$t_{A2}-t_{A1}$与B、C两处的钟速（表现为时间段的长短）相继校准，就是使得$t_{B2}-t_{B1}=t_{A2}-t_{A1}$，$t_{C2}-t_{C1}=t_{B2}-t_{B1}$。再把C钟的钟速与A钟的钟速校准，则得到时间段$t'_{A2}-t'_{A1}=t_{C2}-t_{C1}$。这时，原来的$t_{A1}$，没有对回到原处，而到达了$t'_{A1}$，$t_{A2}$也未对回到原处，而到达了$t'_{A2}$，但满足了$t'_{A2}-t'_{A1}=t_{A2}-t_{A1}$，这两个

时间段相等了。

如果我们调节$t_{A2}-t_{A1}$的长短，使其经B、C二处再对回A处时，t'_{A1}恰好与t_{A2}重合（图9-4），则线段$t_{A2}-t_{A1}$与$t'_{A2}-t'_{A1}$恰好连接，于是我们得到了相等的“相继时间段”。这就正好解决了定义“相继时间段相等”的困难。

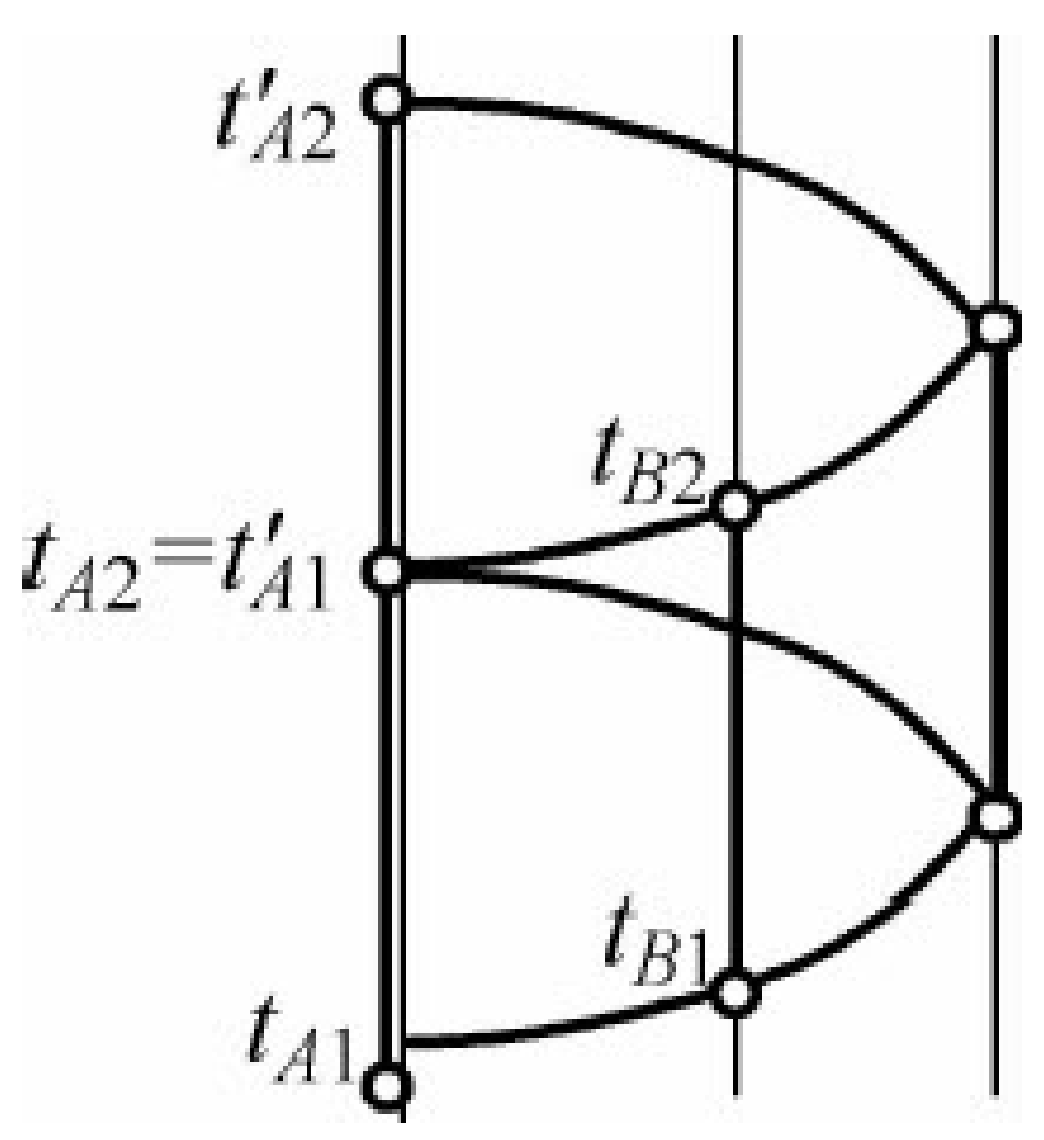


图9-4　相继时间段的相等（Ⅰ）

事实上，操作可以更简化，只需要对一个时刻即可。如图9-5所

示，让A钟的t_{A1}经过与B、C钟的时刻对好，回到A钟的时刻为t_{A2}。然后把t_{A2}再做一次与B、C钟校对，再次对回A钟的时刻为t_{A3}，显然$t_{A3}-t_{A2}$，即图9-4中的$t'_{A2}-t'_{A1}$，也就是说“钟速同步的传递性”可以保证$t_{A3}-t_{A2}=t_{A2}-t_{A1}$，也就保证了同一时钟“相继时间段”的相等。

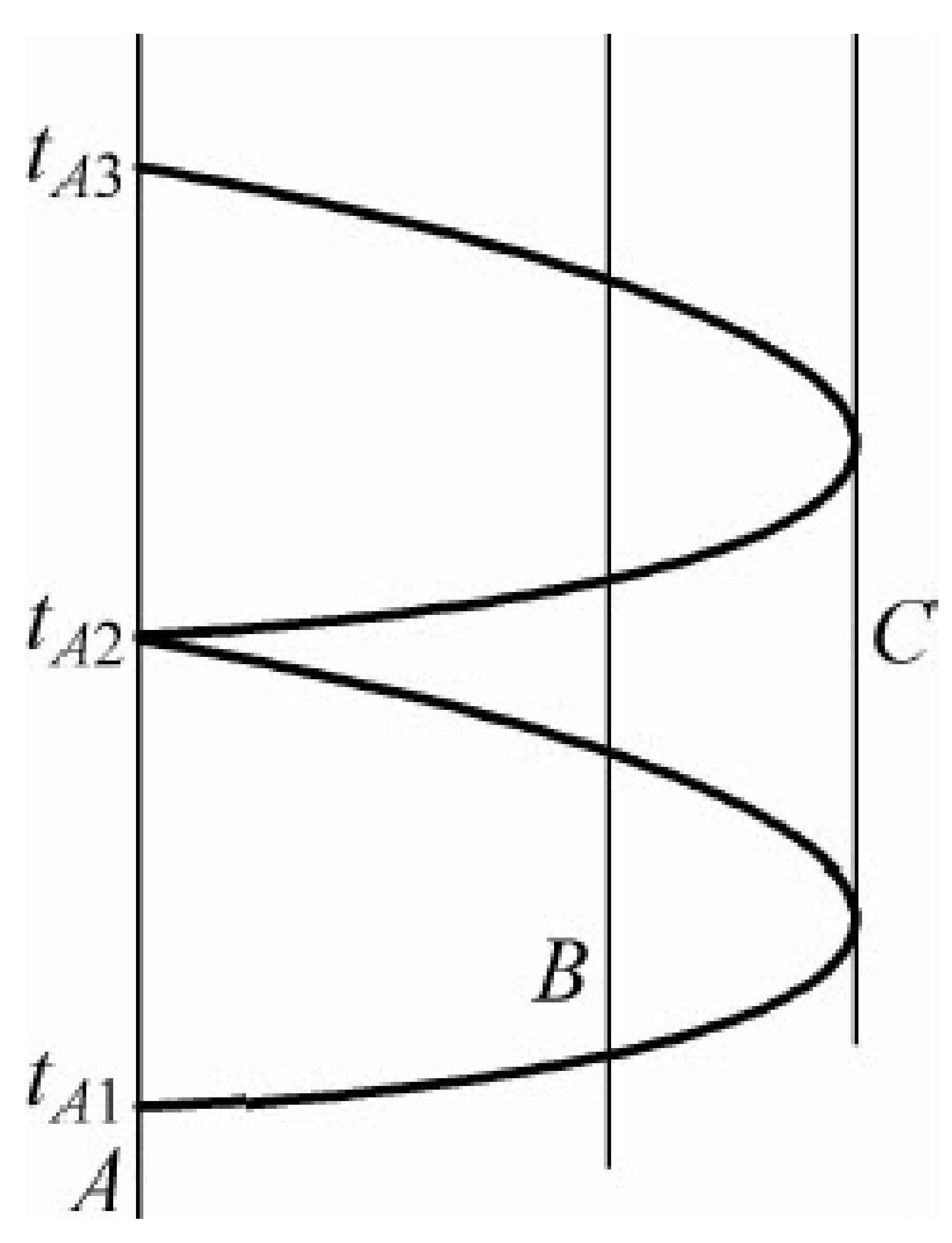


图9-5　相继时间段的相等（II）

我们看到，通过我们自己给出的调整“钟速同步”的方案，不仅可以用上述对光速的“约定”，定义异地时钟“钟速”的“同步”，而且可以定义任一指定坐标钟“相继时间段（又称绵延）”的相等。

我们的上述研究工作，不仅回答了庞加莱提出的时间测量的第一个问题（即异地时钟同步的定义），而且回答了他提出的第二个问题（即相继时间段相等的定义）。这使得我们能够在全时空定义统一的时间（即统一的坐标钟钟速）。因此，现代物理学中关于“好钟”的约定是不需要的。

此前我们的研究曾指出，热力学第零定律保证钟速同步具有传递性。现在我们进一步看到，热力学第零定律保证，不仅可以在全空间，而且可以在全时空，定义统一的时间。

有关内容我们发表在《中国物理快报》上，并收入进我们的几本科研专著。

“约定光速”等价于“约定时空的对称性”

不过，在“好钟”的理论中也还存在合理的因素。即要求能量守恒定律成立是个好的想法，它反映了时间流逝的均匀性。

事实上，对真空中光速的约定，就是对时空对称性的约定。要求真空中的光速点点均匀，相当于要求时间和空间具有均匀性，而时间和空间的均匀性又分别对应着物理学中的能量守恒和动量守恒。要求真空中的光速各向同性，相当于要求空间各向同性，它对应着物理学中的角动量守恒。要求光速不变原理成立，则相当于要求时空存在所谓布斯特（Boost）对称性，也即狭义的洛伦兹变换成立。

现代物理学约定光速是一个常数c，有三层含义，即约定光速均匀、各向同性，而且与光源相对于观测者的运动无关。这就相当于要求时间和空间均匀、空间各向同性，而且光速不变原理成立。也就是说要求时空满足庞加莱对称性。

有引力场的时空不具有整体的庞加莱对称性。然而，测量是局域的，我们只需要约定局部光速，约定光速在每一时空点的邻域均匀各向同性，而且是一个常数c。这一约定对应局域庞加莱不变性。

广义相对论中的测量一定是局域的。我们“对钟”所用的小步雷达法，建立在局域测量的基础上。约定“局域光速”，相当于约定弯曲时空中存在局域庞加莱对称性。这与引力规范理论的主张是一致的。在引力规范理论中，引力场可以看作时空庞加莱对称性局域化而产生的补偿场——规范场。我们这里关于时间测量的讨论，似乎支持广义相对论是一个以庞加莱群为基础的引力规范理论。

从上述讨论可以看出下列关系：

对“真空中光速”的约定 ⇔ 对“时空对称性”的约定

约定真空中光速是常数 c⇔ 约定时空具有庞加莱对称性

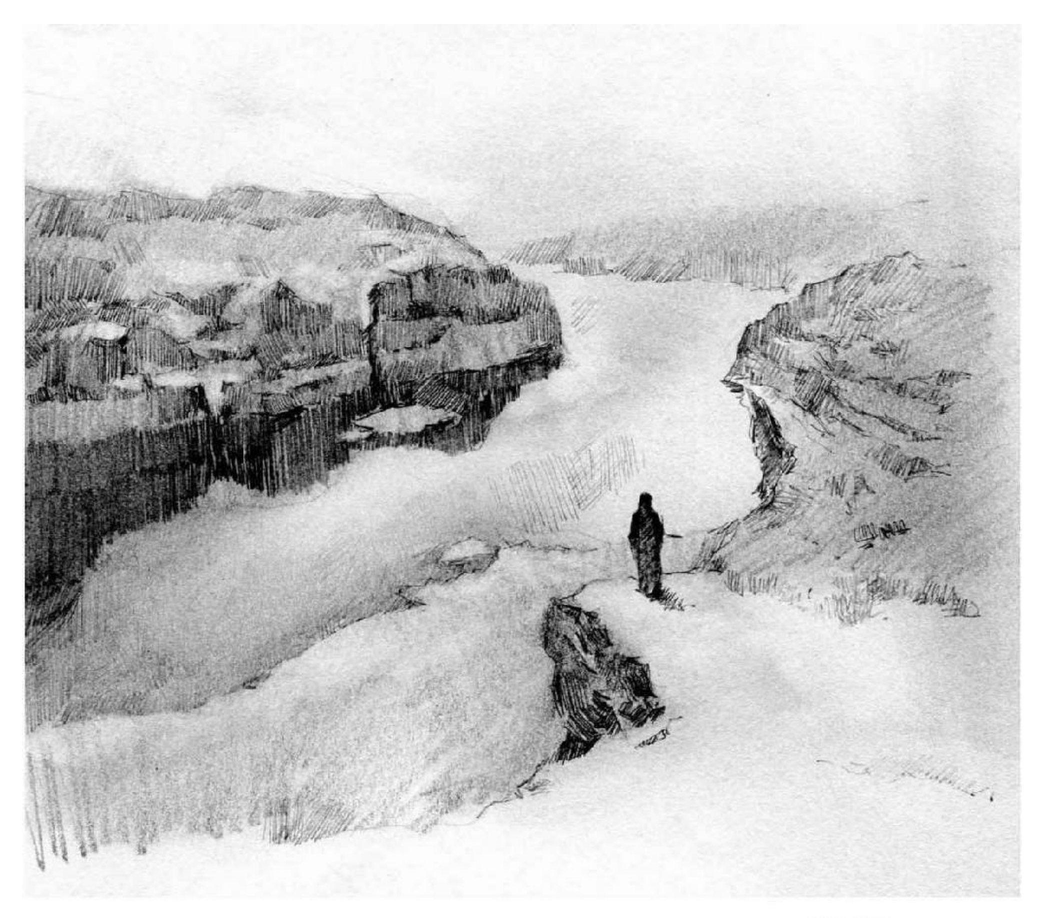
光速的均匀性 ⇔ 时间、空间平移不变性 ⇔ 能量守恒、动量守恒

光速的各向同性 ⇔ 空间转动不变性 ⇔ 角动量守恒

光速不变原理 ⇔ 时空 Boost 不变性 ⇔ 狭义洛伦兹变换

对“好钟”的约定，可以看作对“时空对称性”（特别是时间对称性）的约定。均匀流逝的时间，可以保证能量守恒。各种时空对称性，可以保证物理规律简单。而对“时空对称性”的约定，相当于对光速的约定。

因此，我们只采用“约定光速”的办法，就可以定义异地时钟的同步和相继时间段的相等。“好钟”的存在，不再是一个约定，而只是对光速约定的一个推论。



绘画：张京

第十章　千古难题：时间是什么

在本章中，作者将把哲学家和物理学家们关于时间的杰出论述介绍给读者。

难以回答的问题

时间是什么？这个看似人人皆知的问题，回答起来却万分困难。

公元4世纪，早期基督教思想家圣·奥古斯丁在他的《忏悔录》中写下了一句至理名言：“时间是什么，人不问我，我很清楚，一旦问起，我便茫然。”

现代自然科学认为，时间和空间都是物质延展性的表现。时间是一维的，空间是三维的。静电场强与距离的平方成反比，支持了空间的三维性。也就是说，空间的三维性得到库仑定律的支持。时间的一维性则缺乏有力的支撑，只不过是人们由经验得到的结论，人们似乎很难想象时间会高于一维。

时间是一维的绵延；空间是三维的广延。绵延与广延都属于延展。然而绵延与广延不同，它还有“流逝”的含义。绵延的这种“流逝性”，在物理学上表现为自然过程的不可逆性，表现为热力学第二定律。流逝性的存在使得时间概念比空间概念更为复杂，因而也引起了哲学家和科学家的更多注意。

千百年来，不少伟大的思想家对时间发表了许多精彩的见解，进行了许多深奥的争论。这些见解和争论，加深了人类对时间的认识，给我们带来了光明，也带来了更多的疑义。

时间是永恒的映像

人类的时间概念来源于对事件先后顺序的排列，对因果关系的了解，对昼夜交替和季节变迁的认识。当人类文明发展到一定程度的时候，上述感性认识逐渐升华为理论。

柏拉图认为真实的“实在世界”是“理念”，我们感受和接触到的万物和宇宙都不过是“理念”的“影子”。理念完美而永恒，它不存在于宇宙和时空中。万物和宇宙则是不完美的，处于不断变化中。柏拉图认为造物主给“永恒”创造了一个“动态的相似物”，用以描述变化的宇宙和万物。那就是“时间”。他认为，时间是“永恒”的映像，是“永恒”的动态相似物；时间不停地流逝，模仿着“永恒”。

时间是运动的计数

柏拉图最优秀的学生亚里士多德，把老师的理论倒了过来，认为真实存在的不是“理念”，而是万物和宇宙组成的客观世界。对此柏拉图感到十分痛苦，为此亚里士多德说了一句千古流芳的佳话：“吾爱吾师，吾尤爱真理。”

在把老师的哲学观点倒过来的同时，亚里士多德也对时间发表了不同的见解。他认为“时间是运动的计数”，是“运动和运动持续量的量度”。时间概念的出现，使运动的测量成为可能，使我们可以区分快慢和静止。

无始无终的循环的时间

柏拉图认为时间无始无终，循环流逝，36000年为一个周期。亚里士多德也认为时间循环流逝，周而复始。

事实上，古希腊学术界始终认为时间是循环的，从已知最早的哲学鼻祖泰勒斯开始，到毕达哥拉斯、柏拉图、亚里士多德，他们都坚持或强或弱的循环时间观，并把时间与周期运动联系起来。

毕达哥拉斯学派说时间是天球，柏拉图说时间是天球的运动。亚里士多德认为时间是运动的计数，也把时间与天球的运动挂钩。

古印度同样是循环的时间观点占主导地位，这一观点也体现在佛教的教义中，对中国有一定的影响。

螺旋形发展的时间

然而，影响中国古代哲学思想的不仅有释家（佛教），而且有儒家（孔孟学说）和道家（老庄哲学）。

“子在川上曰：逝者如斯夫，不舍昼夜。”

“逝者”就是时间。孔夫子把时间比作永恒流逝的河流。他强调流逝，就是强调时间的不可逆性，这是他的高明之处。

我们从一些古诗词中也可以看出一些文人的时间观。中国文人的头脑中往往混杂着释家、儒家和道家的思想，他们认为时间不是简单的循环、重复，而是螺旋形发展的。首先是发展、流逝，其次又有一定程度的循环往复。例如唐朝诗人刘庭之（即刘希夷）的诗句

年年岁岁花相似，

岁岁年年人不同。

再如宋代文人晏殊的词

一曲新词酒一杯，

去年天气旧亭台，（循环的相似）

夕阳西下几时回。（时间不停流逝）

无可奈何花落去，（万物与时俱进）

似曾相识燕归来，（循环的相似）

小园香径独徘徊。

有始有终的线性时间

基督教的诞生对人类的时间观产生了重大影响。《圣经》认为世界万物和人类都是上帝创造的。上帝不在时间中，上帝在创造世界的同时创造了时间，因而时间有一个开端，还很可能有一个结束（世界末日）。时间不是循环的，而是线性演化的。

神学家们还明确指出了世界开始的时间，那里应该是时间的原点。宗教改革的创始人马丁·路德认为，上帝创造世界是在公元前4000年。

然而，后来开普勒根据天文研究发现，原来所认为的耶稣诞生之年有误，圣诞年差了4年，耶稣实际诞生于公元前4年。

圣经编年史权威、爱尔兰大主教乌塞尔根据路德和开普勒的研究，最终确定上帝创造世界是在公元前4004年10月22日下午8点。这一刻就是时间开始的原点。

牛顿与莱布尼茨的争论

文艺复兴和哥白尼的日心说划破了欧洲中世纪封建社会的黑暗，使古希腊的科学与艺术重见天日。人们重新开始了对哲学和科学的探讨。

牛顿的老师巴罗对时空有许多精辟的见解，牛顿把巴罗的思想加以发展提升，形成完整的绝对时空观。他认为存在不依赖于物质和运动的绝对时间和绝对空间。

牛顿写道："绝对的、真实的和数学的时间，按其固有的特性均匀地流逝，与一切外在事物无关，又名绵延；相对的、表观的和通常的时间，是可悉知和外在的对运动之延续之度量，它常常用来代替真实的时间，如一小时，一天，一个月，一年。"

牛顿曾提出水桶实验来论证绝对空间的存在，但从来没有提出过任何实验来论证绝对时间的存在。他认为我们通常谈论、测量的时间都不是真实的绝对时间，而只是绝对时间的一种代替物——相对时间（表观时间）。相对时间只不过是"运动延续的度量"。

因此牛顿主张用运动来度量时间，但他认识到，"可能并不存在一种运动可以用来准确地测量时间"，"所有的运动可能都是加速的或减速的，但绝对时间的流逝却不会有所改变"。

在牛顿看来，绝对时间是一条无头无尾、始终如一的河流，没有"源头"，也没有涨落和波涛（这一点与孔夫子的想法非常接近）。时间除了均匀流逝的属性之外，没有其他属性。

也就是说，牛顿认为绝对时间是均匀的，有方向的，没有起点和终

点的，永远存在的“河流”。如果物质消失了，时间和空间还会继续存在。

和牛顿同为微积分创建者，在发明权上与牛顿争吵不休的莱布尼茨，在对时空的看法上也与牛顿针锋相对。

莱布尼茨认为根本就不存在什么绝对空间和绝对时间，时间和空间都是相对的。空间是物体和现象有序性的表现方式，时间是相继发生的现象的罗列。时间和空间都不能脱离物质客体而独立存在。物质消失了，时间和空间也就消失了。

相对论的时空观

爱因斯坦的相对论，掀开了人类认识时空的新篇章。爱因斯坦认为时间是相对的，空间也是相对的，但时空作为一个整体是绝对的。能量是相对的，动量也是相对的，但能量-动量作为一个整体是绝对的。他的狭义相对论，建立起了时间与空间的联系，能量与动量的联系：



在广义相对论中，爱因斯坦进一步建立起时空与物质之间的联系



他认为物质的存在会造成时空的弯曲，弯曲的时空又会反作用于其中的物质，影响物质的运动。在广义相对论中，作为“演员”的物质和作为“舞台”的时空，不再是互不相关的，而是相互影响的。

不过，在相对论中，物质消失后，时空不会消失，时空依然存在，

只不过由弯曲变成了平直。

爱因斯坦晚年对时空的看法

晚年的爱因斯坦，曾经表达过对上述图像的不满，他写道：

“时间-空间未必能看成是可以脱离物质世界的真实客体而独立存在的东西。并不是物体存在于空间中，而是这些物体具有空间广延性。这样看来，‘关于一无所有的空间’的概念，就失去了意义。”

我们看到，晚年的爱因斯坦对时空有了新的看法。他认为：时空是物质伸张性和广延性的表现，不存在一无所有的时空，没有物质就没有时空，时空与物质同存同灭。

爱因斯坦的哲学观点，走在了他的物理理论（狭义相对论与广义相对论）的前面。从上述哲学观点中，不难看出莱布尼茨等人对他的影响。值得注意的是，目前建立量子引力理论的方案中，已有一部分学者采纳了爱因斯坦最后的哲学观点。

时空的泡沫与浪花

相对论极大地改变了人类的时空观念，量子论也在影响人类对时空的认识。宏观上看来平坦均匀的时空，在微观看来却存在量子涨落。不确定关系告诉我们，考察的时空区域越小，感到的量子涨落越激烈。

这就像飞机上的人观察大海一样。当飞机飞得很高时，飞行员觉得海面平静而光滑，降低飞行高度后，飞行员注意到海面上存在微波与涟漪。当飞机贴近海面时，飞行员会看到泡沫与浪花。

因此，相对论界普遍认为，在宇宙诞生的极早期，由于时空区域极小，可能存在着猛烈的时空量子涨落。在那段时期，时空的泡沫与浪花有可能形成复杂的拓扑结构，例如虫洞和多连通的宇宙。

时空的这类复杂结构，有可能伴随着宇宙的膨胀和演化，一直保留到今天。而且，量子引力理论告诉我们，在微观尺度下，时空有可能高于4维，很可能是10维或者11维。

孔夫子和牛顿描述过均匀流逝的时间之河。量子论告诉我们，近距离观察时，河面并不平静，存在着泡沫和浪花（图10-1）。

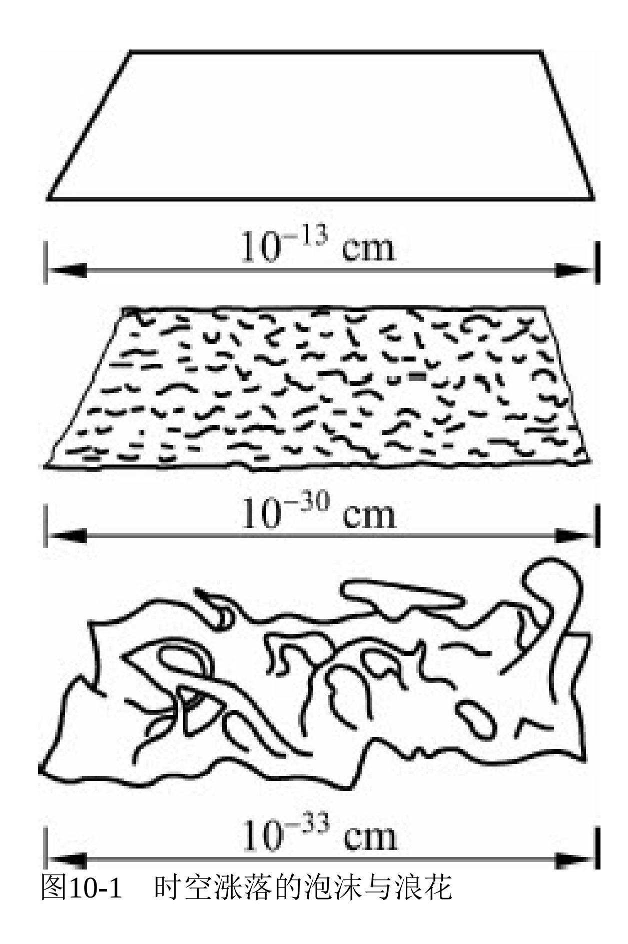


图10-1　时空涨落的泡沫与浪花

是否存在“虚时间”？

量子力学诞生的初期，人们就研究过势垒贯穿。一般认为势垒贯穿是一个瞬时过程，不需要时间。

最近我们在对黑洞隧道效应的研究中，发现弯曲时空中的势垒贯穿也是一种瞬时过程。在虫洞和时空隧道的研究中，人们也谈到穿越欧几里得虫洞是一个瞬时过程。

这类瞬时过程的物理本质是什么？是否意味着虚时间过程的存在？这是目前还不十分清楚的问题。

物理学把时间“空间化”了吗？

我们看到，物理学的发展大大推动了时空观念的发展，促进了人类对时间和空间的认识。可以说，物理学对哲学功不可没。

然而，近年来，物理学中的时间观念却受到哲学家的猛烈批判。最尖锐的指责是“物理学家把时间概念空间化”了，就是只强调了时间与空间的共性，没有强调两者的区别。主要是没有强调时间的“流逝性”，即“不可逆性”。

这种批评意见对物理学的大多数领域是有道理的。包括各种场论、相对论和量子论在内的几乎物理学的所有领域，都只考虑了时间的均匀性、持续性，却回避了时间的流逝性。

然而，在热力学领域，这一批评意见不成立。热力学第二定律明确指出了时间的方向性、流逝性和不可逆性。正是这条定律，成为了哲学界探讨时间流逝性的科学基础，而且到目前为止，它几乎是唯一的科学基础。

时空弯曲与时间之矢

物理学有两个分支非常值得注意，一个是广义相对论，另一个是热力学。

除广义相对论以外所有的物理领域（包括热力学），都把时空看作平直的背景，不考虑物质运动与时空背景之间的相互作用，只有广义相对论认为物质与时空背景有相互作用，物质的存在会使时空背景弯曲，弯曲的时空背景又会反过来影响物质的运动。

除热力学之外的所有物理领域（包括相对论），都不考虑时间的流逝性，都认为物理理论在时间反演（或CPT变换）下不变。只有热力学第二定律显示出时间箭头，指出了时间的流逝性和不可逆性。

看来，未来的物理学家应该把“时空弯曲”和“时间箭头”的考虑渗透到本学科的所有领域，形成一个能够同时反映时间均匀性、持续性和流逝性的统一的物理理论。

熵：时间流逝的计量

时间有两个基本特性：流逝性和测度性。空间只有测度性没有流逝性。因此，时间与空间最大的区别，就是它的流逝性，一去不复返性。

作为物理学最重要定律之一的热力学第二定律，就是要指明时间的流逝性。这条定律所强调的核心——自然过程的不可逆性，清楚地指明了时间流逝的方向。这条定律确定了一个物理量——“熵”，它是混乱度的量度，可以用它来定量地刻画时间的流逝。

自然过程的不可逆性显示了时间箭头的存在，这种时间之箭指向熵增加的方向，无论是摩擦生热等自然过程还是量子力学中的“测量”过程，都指向熵增加的方向，即指向混乱度增加的方向。

时间意味着创造

除去上述明显的从有序到无序转化的过程外，人们还注意到另一类好像完全相反的过程，如生物进化和社会进化。这类过程从无序向有序、从简单向复杂发展，似乎给出了相反的时间箭头。柏格森等哲学家注意到上述过程，因而强调时间意味着创造，意味着进化。

柏格森毕业于巴黎高等师范学院，毕业后在著名科学家帕斯卡的故乡克莱蒙菲中学当教师，后来又做过大学的临时讲师。

“一个暮春时节的黄昏，25岁的教师柏格森散步走到克莱蒙菲城郊。这是法兰西腹地的高原地带，漫山遍野生长着高大的树木，西天的晚霞在万里长空中向东天铺洒开来，远处卢瓦尔河的支流在奔流不息。柏格森站在高处，目睹着河水奔流、树木摇曳、晚霞飘逝，突然对时光之逝产生了一个非常震惊的感觉。”（引自吴国盛《时间的观念》）

这一震撼促使柏格森在当教师的同时，展开了对“时间性质”的研究，完成了他的第一部专著《时间与自由意志》。他提出了以“绵延”为核心的时间理论。

柏格森认为“时间与人的意识和直觉有关”的观点虽然值得商榷，但他强调时间的“动”，时间的“流逝”，把时间看作创造，看作进化的思想却是难能可贵的。柏格森用激情荡漾、技巧高超的演讲，把他的观点广泛传播给大众，引发了震撼的效果，许多年青人深受他的影响。

柏格森对普里高津的启示

著名的物理学家普里高津后来回忆道：“在我年轻的时候，我就读了许多哲学著作，在阅读柏格森的《创造进化论》时所感受到的魔力至今记忆犹新。尤其是他评论的这样一句话：‘我们越是深入地分析时间的自然性质，我们就会越加懂得时间的延续就意味着发明，意味着新形式的创造，意味着一切新鲜事物连续不断地产生。’这句话对我来说似乎包含着一个虽然还难以确定，但是却具有重要作用的启示。”

柏格森把时间看作“创造”与“进化”的思想，是跟我们看到的“生物进化”和“社会进化”相一致的。在生物与社会的进化中，我们看到的是从无序到有序，从简单到复杂的演进。

这些现象似乎与热力学第二定律显示的演化方向相反。第二定律虽然告诉我们时间是“动”的，是“流逝”的，但这种“动”和“流逝”的过程是熵增加的过程，混乱度增加的过程，系统从有序向无序、从复杂向简单演变的过程。

正是柏格森观点与第二定律表面上的矛盾，给了普里高津以重大启示。他在继承物理学衣钵的同时，也接受了柏格森的极具启发性的哲学思想。从此之后，普里高津把自己的毕生精力奉献给了对“不可逆性”和“时间之矢”的研究。

耗散结构

普里高津注意到热力学第二定律推出的熵增加原理，针对的是孤立系统或绝热系统（绝热系统是指该系统与外界不发生热交换），这样的系统与外界没有熵的交换。而生物体、社会单元都是开放系统，与外界有熵交换。

普里高津提出“耗散结构”的概念（这一概念，现在被称为非平衡系统的自组织结构），它指的是一种远离平衡态的开放系统自发地形成有组织的有序结构的情况。

这种系统不断地从外界吸入低熵物质，排出高熵物质，总的效果相当于从外界输入“负熵”。这种系统内部经历着不可逆过程，不断有熵产生，而“负熵”的输入抵消了新产生的熵，从而使系统的熵维持大致不变，因而系统本身相对稳定。

例如一个动物，内部的新陈代谢是不可逆过程，不断产生熵。但该动物不断吃进食物，排出粪便和尿液等。食物中的分子排列比较有序，是低熵物质；排出物（粪便等）中分子排列比较无序，混乱度大，是高熵物质。吃进低熵的食物，排出高熵的排出物，就相当于吸进了“负熵”。这些负熵可以抵消动物体内部新陈代谢增加的熵，从而维持动物体的熵大体不变，因而保持了动物体内的相对稳定。动物体就是一种耗散结构，它是一个不断从外界吸入负熵的开放系统。

一座城市，在生存过程中不断产生垃圾。必须不断向城市运进各种食物和用品（低熵的物质），不断从城中运出垃圾、排出污水（高熵物质），城市才得以生存。所以说，城市也是一种耗散结构，是一个不断

从外界吸入负熵的开放系统。

耗散结构理论，为解释生物和社会的生存与进化打下了基础。我们看到，这种不断进化的客体，从外界吸收负熵，但“客体”本身与“外界”的总熵仍是增加的，因此并不与热力学第二定律矛盾。从普里高津的耗散结构理论可以看出，柏格森把时间看作“创造”与“进化”的观点，并不与热力学第二定律抵触。

普里高津从热力学第二定律，从物理学给出了时间“意味着创造”，“意味着进化”的结论。在《从存在到演化》一书中普里高津指出：“我们看到了某些最近的结论与柏格森、怀特海和海德格尔等哲学家的预期有多么接近。主要的区别是，在他们看来，这样的结论可能只是由于与科学的冲突而得到的，而我们现在把这些结论看作可以说是从科学研究的内部得出的。”

宇宙学的时间箭头

物理学和天文学还给出了另一种时间箭头——宇宙学箭头。许多文章介绍了大爆炸宇宙学。这一理论指出，宇宙从奇点开始，大爆炸后不断膨胀，不断降温。虽然对于宇宙发展的不同阶段，膨胀速度如何，膨胀是否经历过减速和加速，大家意见尚未统一，但宇宙从开始到现在，一直在膨胀，一直在降温，却是公认的结论。大家都认为，随着宇宙膨胀，宇宙的熵在增加，与热力学第二定律一致。

无限无边的宇宙会一直膨胀下去，一直降温，熵也会一直增长下去。有限无边的宇宙膨胀到一个最大体积后会收缩，在收缩阶段，温度会升高，至于宇宙中的熵如何变化，有两种意见，一种认为熵会减少，甚至有人认为这意味着时间会倒流。这时热力学第二定律会被破坏，或者第二定律这时可能改为“熵减少”的说法。不过绝大多数人认为，在宇宙收缩阶段，熵仍会增加，第二定律仍然成立，时间箭头绝不会倒过来。

近年来彭罗斯等人从微分几何和广义相对论角度做了有意思的探讨，他们试图用一个叫做“魏尔张量”的几何量来刻画熵，论证在宇宙的收缩阶段，熵将继续增加，大塌缩的终极奇点不同于大爆炸的初始奇点，二者并不对称，终极奇点的熵高于初始奇点的熵。

心理学的时间箭头

还有一个时间箭头是心理学时间箭头。其含义是：人类只能回忆过去，不能忆及未来。这表明，从心理的角度看，“过去”与“未来”是不对称的。实际上我们对未来会如何，可以设想多种可能性，但只能实现其中一种，而且不可逆转，也不能反悔。时间的进展，意味着不断地把不确定的“未来”，转化成为确定的“现在”，继而成为确定的“过去”。

这种情况有点像量子力学中的测量，测量使量子的纯态转化为混合态，从多个纯态的叠加塌缩到一个确定的态。在量子力学测量过程中，熵在增加。从过去向未来的发展，也肯定伴随着熵增加。由此看来，心理学的时间箭头只不过是热力学时间箭头的反映，是热力学第二定律的另一种表现。

从上面的讨论可以看出，热力学第二定律所给出的“不可逆性”是所有各种时间箭头的科学基础。因此，不仅生物学、社会学的时间箭头，而且宇宙学、甚至心理学的时间箭头，都不过是热力学时间箭头的推论。所以我们可以说，物理学没有把时间空间化。而且，能够指出时间流逝性的科学，唯有物理学。

然而，物理界也应从哲学界的批评中吸取正确的成分，注意努力把时间的流逝性渗透到自己的各个分支中去。

时间之矢何以产生？

另一个问题是：以分子运动论为代表的统计力学描述的微观粒子运动都是可逆的力学运动，何以大量粒子的行为会呈现出宏观的不可逆性？呈现出时间箭头？从玻耳兹曼开始就对这一问题进行过探讨。玻耳兹曼给出了熵的表达式，给出了研究碰撞的玻耳兹曼方程和H定理，使这一问题的研究取得了重要进展。然而问题还没有解决。

普里高津等人推动的“对时间的再发现”的研究，在耗散结构、混沌等领域都取得了进展，但对时间之箭何以出现，仍然不能给出解释。

值得注意的一件工作是普里高津曾经耗费大量心血的、一次没有成功的尝试。他试图用非幺正变换来引进不可逆性，使微观的可逆过程过渡到宏观的不可逆过程。为此他与密斯纳等做了大量的数学、物理研究，并取得了一些进展。然而在他们的工作中，需要在两个对称的演化序列中做一次初始的选择，有人怀疑正是这一选择暗含了“不可逆性”，因此不能认为他们的工作已经成功。不过，笔者认为他们采用非幺正变换来表述不可逆性的做法值得借鉴。

在讨论黑洞信息疑难的时候，人们注意到信息丢失（熵增加）会破坏量子理论的幺正性。由于信息可以看做负熵，信息的缺失意味着熵增加，可见，把“不可逆性”与非幺正变换相联系是一个正确的方向。

从原则上讲，不可逆性并不需要有一个根源，它本身就是根源。热力学第二定律本身是一条基本公理，根本不需要导出，我们需要解决的问题只是：大量微观粒子的可逆运动何以在宏观上呈现出不可逆性，呈现出时间箭头。

展望

对广义相对论和黑洞的研究，引导我们走向了对时间之河的探索。我们在研究中发现：时间与热力学之间似乎存在着比迄今所知更为深刻的内在联系。

在我们看来，热力学的四条定律都与时间的性质有关：第零定律表明，时间是可以定义的；第一定律表明，时间是均匀的；第二定律表明，时间是流逝的，有方向的；第三定律表明，时间是无穷无尽的，既没有开始，又没有结束。

时间就像一条既没有源头，又没有终点的河流，向着特定的方向均匀地流逝着，远看起来，它十分平静，近看起来，会发现它有量子效应导致的涟漪、波涛和浪花。

人类对时间的认识在不断深化，但是至今仍然无法回答“时间究竟是什么”这一难题。

主要参考书目

科学著作与教材

［1］爱因斯坦A．相对论的意义［M］．李灏，译．北京：科学出版社，1961．

［2］Newton I．Mathematical Principles of Natural Philosophy［M］．Cambridge： Cambridge University Press，1934．

［3］朗道，栗弗席兹．场论［M］.8版.鲁欣，任朗，袁炳南，译．邹振隆，校．北京：高等教育出版社，2012．

［4］温伯格S．引力论和宇宙论［M］.邹振隆，张历宁，等，译．北京：科学出版社，1980．

［5］刘辽，赵峥．广义相对论［M］．2版．北京：高等教育出版社，2004．

［6］梁灿彬，周彬．微分几何入门与广义相对论［M］．2版.北京：科学出版社，2006．

［7］俞允强．广义相对论引论［M］．北京：北京大学出版社，1987．

［8］须重明，吴雪君．广义相对论与现代宇宙学［M］．南京：南京师范大学出版社，1999．

［9］王允然，鲁菲尼R.相对论天体物理的基本概念［M］．上海：上海科学技术出版社，1981．

［10］瓦尼安H　C，鲁菲尼R．引力与时空［M］．向守平，冯珑珑，译．北京：科学出版社，2006．

［11］赵峥．黑洞的热性质与时空奇异性［M］．北京：北京师范大学出版社，1999．

［12］刘辽，赵峥，田贵花，等．黑洞与时间的性质［M］．北京：北京大学出版社，2008．

［13］赵峥．黑洞与弯曲的时空［M］．太原：山西科学技术出版社，2000．

［14］赵峥，刘文彪．广义相对论基础［M］．北京：清华大学出版社，2010．

［15］Wald R M．General Relativity［M］．Chicago：The University of Chicago Press，1984．

［16］Hawking S W，Ellis G F R．The Large Scale Structure of Space-time［M］．Cambridge： Cambridge University Press，1973．

［17］Birrell N D，Davies P C W．Quantum Fields in Curved Space［M］．Cambridge： Cambridge University Press，1982．

［18］Rindler W．Essential Relativity［M］．New York：Springer-Verlag，1977．

［19］Misner C W，Thorne K S，Wheeler J A．Gravitation［M］．San Francisco： Freeman W H Company，1973．

［20］王永久．经典黑洞与量子黑洞［M］．北京：科学出版社，2008．

［21］Prigogine I．From Being to Becoming［M］．San Francisco：Freeman W H and Company，1980．

［22］普里高津．从存在到演化［M］．曾庆宏，严士健，马本堃，等，译．上海：上海科学技术出版社，1986．

［23］胡中为，萧耐园，朱慈盛．天文学教程［M］．北京：高等教育出版社，2003．

科普类

［24］爱因斯坦A．狭义与广义相对论浅说［M］.杨润殷，译．上海：上海科学技术出版社，1964．

［25］霍金S W．时间简史［M］．许明贤，吴忠超，译．长沙：湖南科学技术出版社，1994．

［26］彭罗斯R．皇帝新脑［M］．许明贤，吴忠超，译．长沙：湖南科学技术出版社，1994．

［27］霍金S W．霍金讲演录［M］．杜欣欣，吴忠超，译．长沙：湖南科学技术出版社，1994．

［28］霍金S，彭罗斯R．时空本性［M］．杜欣欣，吴忠超，译．长沙：湖南科学技术出版社，1996．

［29］陶宏．每月之星［M］．上海：开明书店，1949．

［30］王允然，褚耀泉．从牛顿定律到爱因斯坦相对论［M］．北京：科学出版社，1982．

［31］卢米涅J P．黑洞［M］．卢炬甫，译．长沙：湖南科学技术出版社，1997．

［32］纳里卡J　V．轻松话引力［M］．卢炬甫，译．长沙：湖南教育出版社，2000．

［33］徐一鸿．爱因斯坦的玩具：探寻宇宙和引力的秘密［M］．张礼，译．北京：清华大学出版社，2013．

［34］卢昌海．从奇点到虫洞：广义相对论专题选讲［M］．北京：清华大学出版社，2013．

［35］索恩K　S．黑洞与时间弯曲［M］．李泳，译．长沙：湖南科学技术出版社，2000．

［36］吴国盛．时间的观念［M］．北京：中国社会科学出版社，1996．

［37］诺维科夫．时间之河［M］．吴王杰，陆雪莹，译．上海：上海科学技术出版社，2001．

［38］保罗·戴维斯．关于时间［M］．崔存明，译．长春：吉林人民出版社，2002．

［39］彭加勒．科学与假设［M］．李醒民，译．北京：商务印书馆，2006．

［40］彭加勒．科学的价值［M］．李醒民，译．北京：商务印书馆，2007．

［41］赵峥．探求上帝的秘密［M］．北京：北京师范大学出版社，2009．

［42］赵峥．物理学与人类文明十六讲［M］．北京：高等教育出版社，2008．

［43］邓乃平．懂一点相对论［M］．北京：　中国青年出版社，1979．

［44］赵峥．相对论百问［M］．北京：北京师范大学出版社，2010．

［45］赵峥．物含妙理总堪寻［M］．北京：清华大学出版社，2013．

［46］郭中一．科学，从好奇开始［M］．台北：文经社，2005．

科学史

［47］郭奕玲，沈慧君．物理学史［M］．2版．北京：清华大学出版社，2005．

［48］Pais A．The science and the life of Albert Einstein［M］．Oxford：Oxford Univ．Press，1982．

［49］派斯．爱因斯坦传［M］．方在庆，李勇，等，译．北京：商务印书馆，2006．

［50］乔治·伽莫夫．物理学发展史［M］.高士圻，译.北京：商务印书馆，1981．

［51］沃尔特·艾萨克森．爱因斯坦传［M］.张卜天，译.长沙：湖南科学技术出版社，2012．

［52］怀特M，格里宾J．斯蒂芬·霍金的科学生涯［M］．洪伟，译．周环，校．上海：上海译文出版社，1997．